



Ruben Filipe
Pereira da Silva

Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira



**Ruben Filipe
Pereira da Silva**

Cálculo ao Fogo de Ligações de Madeira

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família, pelo incansável apoio que me dão, em especial aos meus pais e à minha querida irmã.

o júri

presidente

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor João Henrique Oliveira Negrão

Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim

Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Pelo seu incondicional apoio e orientação a este trabalho, quero agradecer ao Prof. Doutor Paulo Cachim.

Agradeço também aos meus colegas de curso pelo apoio dado e em particular ao Jorge Gadelho.

Gostaria de deixar também um agradecimento especial à minha irmã Marta Silva, pelos conselhos e pelo seu apoio.

palavras-chave

madeira, ligações, cavilha, fogo, Eurocódigo 5, ligadores.

resumo

Nas estruturas de madeira as ligações são pontos críticos, constituem locais de transmissão de esforços, que condicionam o desempenho global da estrutura. É necessário garantir ligações compatíveis com as solicitações impostas, em condições normais e em situação de incêndio.

Este trabalho consiste no cálculo segundo o Eurocódigo 5 – Cálculo de estruturas de madeira, de diferentes ligações, com ligadores tipo cavilha e conectores, para temperatura ambiente e em situação de incêndio. São analisados, a escolha dos ligadores em função da carga/geometria da ligação e os resultados obtidos para um tempo de resistência ao fogo de 30 e 60 minutos, considerando ligações protegidas e desprotegidas. O Eurocódigo 5, parte 1-2 – Dimensionamento ao fogo, apresenta dois métodos de cálculo, o método simplificado, de natureza empírica e o método de redução da carga, de base experimental. No presente trabalho realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos aplicando separadamente cada método. Utilizaram-se também ligações protegidas, tendo-se verificado que este é um modo eficaz e fácil de conseguir uma elevada resistência ao fogo das ligações.

keywords

timber, joints, dowel, fire, Eurocode 5, fasteners.

abstract

In timber structures, joints are critical points, places where the forces are transmitted between the members, which determine the overall performance of the structure. It is necessary to ensure that joints are compatible with the loads in normal and fire situations.

This work consists in the design, according the Eurocode 5 – Structural timber design, of different connections with dowel-type fasteners and connectors, at room temperature and fire loading. The choice of fasteners was carried out according to the load/geometry of the joint, and the results obtained for 30 and 60 minutes of fire resistance, for protected and unprotected connections. The Eurocode 5 part 1-2 – Structural fire design, gives two different calculation methods: the simplified method, mostly empirical, and the reduced load method, based on experimental results. In this work a comparative analysis of the results obtained with each method is presented. In addition protected connections were also used and the results showed that this is an effective and easy way to achieve a high fire resistance.

ÍNDICE GERAL

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e Objectivos.....	1
1.2 Conteúdo.....	2
2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	5
2.1 Evolução das ligações.....	5
2.2 Ligações Tradicionais.....	5
2.3 Ligações Coladas.....	7
2.4 Ligações Mecânicas.....	8
2.4.1 Ligadores “tipo cavilha”	9
2.4.2 Conectores	12
3 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES	15
3.1 Capacidade Resistente de ligadores do tipo cavilha.....	15
3.1.1 Momento de cedência plástica.....	19
3.1.2 Resistência ao esmagamento	19
3.1.3 Resistência axial dos ligadores	21
3.2 Capacidade resistente de conectores	22
3.3 Disposições Construtivas.....	24
3.3.1 Espaçamentos e distâncias mínimas	25
3.3.2 Ligações com ligadores múltiplos	28
4 DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE LIGAÇÕES	29
4.1 Aspectos Gerais	29
4.1.1 Valores de cálculo das propriedades dos materiais e das resistências.....	29
4.1.2 Métodos de verificação.....	30
4.2 Comportamento ao Fogo	32
4.3 Método Simplificado	36
4.3.1 Ligações desprotegidas.....	36

4.3.2	Ligações protegidas	38
4.4	Método da redução da carga.....	42
4.4.1	Ligações desprotegidas.....	42
4.4.2	Ligações protegidas	43
4.5	Diagrama de dimensionamento ao fogo para ligações	44
5	ESTUDOS SOBRE AS LIGAÇÕES	45
5.1	Aspectos gerais	45
5.1.1	Características dos ligadores	46
5.1.2	Características dos elementos de madeira	47
5.2	Dimensionamento das ligações à temperatura ambiente.....	50
5.2.1	Pregos	51
5.2.2	Parafusos e cavilhas.....	53
5.2.3	Conectores	54
5.3	Dimensionamento das ligações em situação de incêndio.....	56
5.3.1	Verificação ao fogo dos elementos de madeira	56
5.3.2	Aplicação do MÉTODO 1	58
5.3.3	Aplicação do MÉTODO 2.....	63
6	DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	71
6.1	Temperatura ambiente	71
6.2	Situação de incêndio	74
6.3	Comparação Método1-Método2.....	77
7	CONCLUSÕES	79
7.1	Conclusões Gerais	79
7.2	Sugestões para futuros desenvolvimentos	80
	BIBLIOGRAFIA	81
	ANEXO A	83
	ANEXO B	89

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Exemplos de ligações tradicionais de madeira (Larsen 2003).....	6
Figura 2.2 - Diagrama de forças numa ligação por entalhe de dente simples (Palma and Cruz 2007)	7
Figura 2.3 - Três tipos de soluções de reforço (Branco, Cruz et al. 2006)	7
Figura 2.4 - Exemplo de uma ligação colada	8
Figura 2.5 – Tipos de pregos	10
Figura 2.6 – Tipos de Parafuso de Enroscar	11
Figura 2.7 – Configurações típicas de parafusos de porca	11
Figura 2.8 – Configuração típica de cavilha.....	12
Figura 2.9 – Placas denteadas (À esq. Placa de uma face, à dir. Placa de dupla face).....	13
Figura 2.10 – Anel Metálico.....	14
Figura 2.11 – Placas Metálicas em duas configurações possíveis.....	14
Figura 3.1 – Diferentes modos de rotura (EN1995-1-1 2004)	17
Figura 3.2 – Modos de rotura para corte simples e corte duplo (EN1995-1-1 2004).....	19
Figura 3.3 – Relação entre a tensão de esmagamento e a deformação em parafusos (Sawata and Yasumura 2002).....	20
Figura 3.4 – Dimensões relevantes para ligações anéis ou placas metálicas	23
Figura 3.5 – Dimensões para ligações com placas denteadas	24
Figura 3.6 - Afastamentos mínimos	25
Figura 3.7 - Distâncias ao topo e ao bordo (α é o ângulo formado pela direcção do esforço com o fio da madeira).....	26
Figura 4.1 – Exemplos da redução do factor n_{fi} versus o rácio de carga $QK, 1/GK$ (EN1995-1-2 2004)	32
Figura 4.2 – Zonas de degradação numa secção de madeira (Arguelles and Martitegui 2000).....	33
Figura 4.3 – Espessuras de carbonização $d_{char, n}$ e $d_{char, 0}$ (Konig and Winter 2004) .	34
Figura 4.4 – Exemplo de uma secção residual de um elemento de madeira, com ligadores metálicos, exposta ao fogo (Andrea, Carsten et al. 2009)	35
Figura 4.5 – Ligação simétrica em duplo corte	36
Figura 4.6 – Distância adicional a_{fi} (EN1995-1-2 2004)	38
Figura 4.7 – Exemplos de elementos de protecção adicional (EN1995-1-2 2004)	39

Figura 4.8 – Exemplo de protecção da cabeça de um parafuso de porca (EN1995-1-2 2004)	40
Figura 4.9 – Protecção dos bordos da ligação (EN1995-1-2 2004).....	41
Figura 4.10 – Gráfico da relação de carga e o tempo de resistência, para pregos, parafusos e cavilhas	42
Figura 5.1 – Ligação aço-madeira com chapa metálica lateral	48
Figura 5.2 – Ligação aço-madeira com chapa metálica central	48
Figura 5.3 – Ligação madeira-madeira.....	48
Figura 5.4 – Ligação aço-madeira, com chapa metálica lateral (em 3D).....	49
Figura 5.5 – Ligação aço-madeira, com chapa metálica central (em 3D)	49
Figura 5.6 – Ligação madeira-madeira (em 3D)	49
Figura 5.7 – Dimensões em ligação pregada (EN1995-1-1 2004)	52
Figura 6.1 – Gráfico de custo da ligação A-M-A.....	72
Figura 6.2 – Gráfico de custo da ligação M-A-M	73
Figura 6.3 – Gráfico de custo da ligação M-M-M.....	73

Índice de Tabelas

Tabela 3-1 – Equações do EC5 para o cálculo de M_y, R, k	19
Tabela 3-2 - Equações do EC5 para o cálculo de f_{hk} em pregos e parafusos de enroscar com $d \leq 6mm$	20
Tabela 3-3 - Equações do EC5 para o cálculo de f_{hk} em parafusos de porca, cavilhas e em parafusos de enroscar com $d > 6mm$	21
Tabela 3-4 – Resistência ao arranque dos ligadores.....	22
Tabela 3-5 – Factores k_i	24
Tabela 3-6 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligadores e conectores	27
Tabela 3-7 – Número efectivo de ligadores.....	28
Tabela 4-1 – Valores de K_{fi}	30
Tabela 4-2 – Taxas de carbonização β_0 e β_n	34
Tabela 4-3 – Resistência ao fogo de ligações desprotegidas com elementos laterais de madeira	37
Tabela 4-4 – Larguras das placas metálicas com bordos desprotegidos	41
Tabela 4-5 – Parâmetro k	43
Tabela 5-1 – características dos ligadores	46
Tabela 5-2 - Dimensões das secções transversais dos elementos de madeira.....	47
Tabela 5-3 – Dimensionamento das ligações usando pregos	52
Tabela 5-4 – Dimensionamento das ligações usando parafusos de porca e cavilhas	54
Tabela 5-5 – Dimensionamento das ligações usando placas denteadas e anéis e placas metálicas	55
Tabela 5-6 – Verificação ao fogo dos elementos de madeira.....	57
Tabela 5-7 – Incremento a_{fi}	58
Tabela 5-8 – Aplicação de a_{fi} à ligação M-A-M	59
Tabela 5-9 – Aplicação de a_{fi} à ligação M-M-M	60
Tabela 5-10 – Fórmulas para o cálculo da espessura das placas de protecção.....	61
Tabela 5-11- Espessuras das placas de protecção	61
Tabela 5-12 – Dimensionamento de placas de protecção.....	62
Tabela 5-13 – Verificação ao fogo para a ligação M-A-M	65
Tabela 5-14 – Verificação ao fogo para a ligação M-M-M.....	66

Tabela 5-15 – Cálculo do tempo de resistência ao fogo para a ligação M-A-M.....	68
Tabela 5-16 – Cálculo do tempo de resistência ao fogo para a ligação M-M-M	69
Tabela 6-1 – Preços médios em Euros dos ligadores	72
Tabela 6-2 – Ligadores adoptados por geometria e esforço actuante.....	74
Tabela 6-3 – Percentagem de aumento da capacidade de carga necessário para alcançar uma resistência ao fogo de 30 minutos.....	76

Lista de Símbolos

A	Área da secção transversal
$F_{ax,Rk}$	Resistência ao arranque característica do ligador
F_d	Força de cálculo
$F_{v,Rd}$	Capacidade de carga de cálculo, por plano de corte e por ligador
$F_{v,Rk}$	Capacidade de carga característica, por plano de corte e por ligador
$M_{y,Rk}$	Momento de cedência plástico característico do ligador
d	Diâmetro
d_c	Diâmetro do conector
d_{ef}	Diâmetro efectivo
$f_{c,0,d}$	Tensão de compressão de cálculo paralelo às fibras
$f_{c,90,k}$	Tensão de compressão característica perpendicular às fibras
$f_{h,k}$	Tensão de esmagamento característica
$f_{t,0,k}$	Tensão de tracção característica paralela às fibras
$f_{t,90,d}$	Tensão de tracção de cálculo perpendicular às fibras
$f_{u,k}$	Tensão de cedência característica dos parafusos
h_e	Profundidade de penetração
K_{flux}	Coefficiente do fluxo de calor para os ligadores
K_{mod}	Factor de modificação para duração da carga e humidade
$K_{mod,fi}$	Factor de modificação em situação de incêndio
n_{ef}	Número efectivo de ligadores
t	Espessura/Tempo de exposição ao fogo
t_{ch}	Tempo de início de carbonização
$t_{d,fi}$	Tempo de resistência ao fogo de ligações não protegidas
α	Ângulo entre a força e a direcção das fibras
η	Factor de conversão para a redução da resistência em situação de incêndio
γ_M	Factor parcial para as propriedades dos materiais
$\gamma_{M,fi}$	Factor parcial em situação de incêndio
ρ_k	Densidade característica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Objectivos

A construção em madeira constitui uma importante parte das infra-estruturas em muitos países no mundo. A madeira é um material resiliente e de baixa densidade, e que tem ganho muita notoriedade pela sua agradável estética em termos arquitectónicos, associado à sua fácil laboração. A utilização da madeira como elemento estrutural constitui ainda um domínio pouco explorado no nosso país. Com a entrada em vigor do Eurocódigo 5 referente ao cálculo de estruturas de madeira, essa situação tem vindo a se alterar progressivamente, e é uma área em pleno crescimento actualmente.

A verdade é que a utilização da madeira como elemento estrutural ainda não conseguiu atingir o patamar onde estão outros materiais de construção como o betão e o aço, e isso se deve claramente às suas desvantagens, o facto de ser um material anisotrópico e heterogéneo, a sua susceptibilidade a ataques biológicos e também um pouco de desconhecimento sobre este material. O grande incremento que a madeira tem actualmente como material estrutural, deve-se em parte à crescente procura por materiais ecológicos, mas principalmente pelo surgimento da madeira lamelada colada, que vêm colmatar grande parte das desvantagens da madeira, e trazer confiança e uma liberdade inigualável frente a outros materiais, para o dimensionamento de uma estrutura.

Associado a esta nova tecnologia da madeira no mercado, está a utilização de maiores vãos e maior complexidade das estruturas de madeira, facto esse que torna as ligações um ponto fulcral na globalidade das estruturas. Durante o desenvolvimento de um projecto de estruturas de madeira, a fase de cálculo dos elementos de madeira normalmente antecede o cálculo das ligações a utilizar. Esse papel secundário que aparentemente pode induzir às ligações, não deve significar uma menor importância, aliás deve ser dado a maior atenção, já que constituem pontos de transmissão de esforços e zonas sensíveis das estruturas.

As ligações têm em geral um custo elevado na globalidade das estruturas. Contudo, esse valor é variável e depende do tipo de estrutura e este pode chegar a um quarto do total do custo da estrutura. Como tal, são fundamentais no desempenho estrutural de toda a estrutura, sendo portanto necessário garantir ligações compatíveis com as solicitações mecânicas impostas, oferecendo resistência, durabilidade e segurança.

Em situação de incêndio a madeira é um material combustível e portanto difere dos comuns materiais usados na construção. Apesar disso a madeira apresenta uma boa resistência ao fogo, arde lentamente e a camada carbonizada que se forma é um ótimo isolante para a madeira intacta no interior. Os ligadores, ao serem metálicos contribuem para a expansão do calor pelo interior da madeira. Como factor importante que são, devem garantir a mesma resistência ao fogo que os elementos de madeira, de modo a que as estruturas na sua globalidade tenham a resistência adequada para a qual foi dimensionada.

A principal motivação pessoal para o desenvolvimento deste trabalho, é o facto de poder contribuir para o enriquecimento da bibliografia sobre estruturas de madeira em português, que tem grandes lacunas nesta área, aliado ao facto de servir para uma maior e melhor utilização da madeira como elemento estrutural.

O principal objectivo desta dissertação consiste na análise do dimensionamento ao fogo presente no Eurocódigo 5, efectuando o cálculo para vários tipos de ligação e ligadores. Dos dois métodos que apresenta o Eurocódigo 5 e ambos possíveis de serem utilizados, é feita uma comparação de modo a conhecer os pontos fortes e as limitações de cada um.

Além desse principal objectivo, é alvo de estudo o cálculo das ligações à temperatura ambiente, também como forma de comparação e de ponto de partida para a sua verificação ao fogo. Nesse estudo pretende-se saber que ligadores são os mais adequados em função do esforço actuante.

Esta dissertação também pretende contribuir para uma simplificação da informação presente no Eurocódigo 5, para uma melhor compreensão deste.

1.2 Conteúdo

Esta dissertação tem como base o Eurocódigo 5 - Projecto de estruturas de madeira, e é sobre ele que assentam todos os capítulos e estudos aqui realizados. O trabalho está dividido em quatro áreas principais, primeiro uma introdução às ligações, depois o dimensionamento a temperatura ambiente e em situação de incêndio e por fim os estudos feitos sobre as ligações e as respectivas conclusões.

No capítulo 2 é feita uma pequena introdução aos vários tipos de ligação, sendo abordados em especial os ligadores mecânicos, tipo cavilha e conectores, que serão alvo de estudo.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia de dimensionamento a temperatura ambiente presente no Eurocódigo 5, parte 1-1. Neste capítulo procura-se apresentar os dados de uma forma mais simples e organizada, principalmente agrupando em tabelas a informação que se encontra um pouco dispersa no Eurocódigo.

O capítulo 4 refere-se ao dimensionamento em situação de incêndio das ligações e a apresentação dos dois métodos descritos no Eurocódigo 5, parte 1-2, para ligações desprotegidas e protegidas. Inclui também uma pequena introdução sobre os parâmetros do cálculo ao fogo e o comportamento da madeira e das ligações.

O capítulo 5 apresenta os estudos efectuados para diferentes ligações e ligadores, incluindo os cálculos e os resultados obtidos para temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Por fim é apresentada a análise e a discussão dos resultados obtidos no capítulo anterior e a conclusão final ao trabalho.

2 LIGAÇÕES EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

2.1 Evolução das ligações

Desde os tempos remotos que o Homem usa a madeira como material estrutural, e desde logo surgiu a necessidade de ligar os diversos elementos de madeira, para a edificação das primeiras habitações. Surgem portanto as primeiras ligações em madeira, absolutamente necessárias para garantir a estabilidade das primeiras construções. As estruturas adquiriram uma maior complexidade e novas técnicas de ligação foram desenvolvidas de modo a garantir a adequada transferência de esforços entre os elementos de madeira, ou também como parte integrante de sistemas estruturais, como por exemplo as treliças.

Os vários tipos de ligações podem ser classificados relativamente a diversos aspectos. No que diz respeito ao factor temporal, podemos fazer duas distinções: ligações clássicas e ligações modernas. Quanto ao tipo de tecnologia empregue, podemos ter ligações por entalhe (ligações tradicionais), ligações mecânicas (que recorrem a elementos metálicos para a junção dos elementos) e ligações coladas (através do recurso a compostos químicos).

Os materiais constituintes de uma ligação em madeira são: o aço, os derivados de madeira, e naturalmente a madeira maciça. A evolução das ligações tradicionais de madeira-madeira para o uso de outros materiais deveu-se principalmente à necessidade de aligeiramento das estruturas e ao mesmo tempo garantir uma boa transmissão de esforços e uma melhor estabilidade da ligação.

Nas ligações modernas, o progresso no domínio das ligas metálicas, faz com que os ligadores utilizados passem a ser metálicos. É natural que o interesse no estudo e desenvolvimento dos ligadores seja enorme, com o aparecimento de diferentes ligadores que vão desde o simples prego, às placas metálicas denteadas, e da colagem.

2.2 Ligações Tradicionais

As ligações tradicionais consistem numa ligação em que uma peça de madeira se une directamente a outra, usualmente sem elementos auxiliares, mediante um trabalho de carpintaria.

Este tipo de ligação funciona por compressão e esforços tangenciais que equilibram os esforços axiais. Os tipos de ligações tradicionais são múltiplos, já que estão submetidos aos costumes e tradições de carpintaria das diferentes zonas geográficas. Assim, na Figura 2.1, estão alguns exemplos de tipos de ligações.

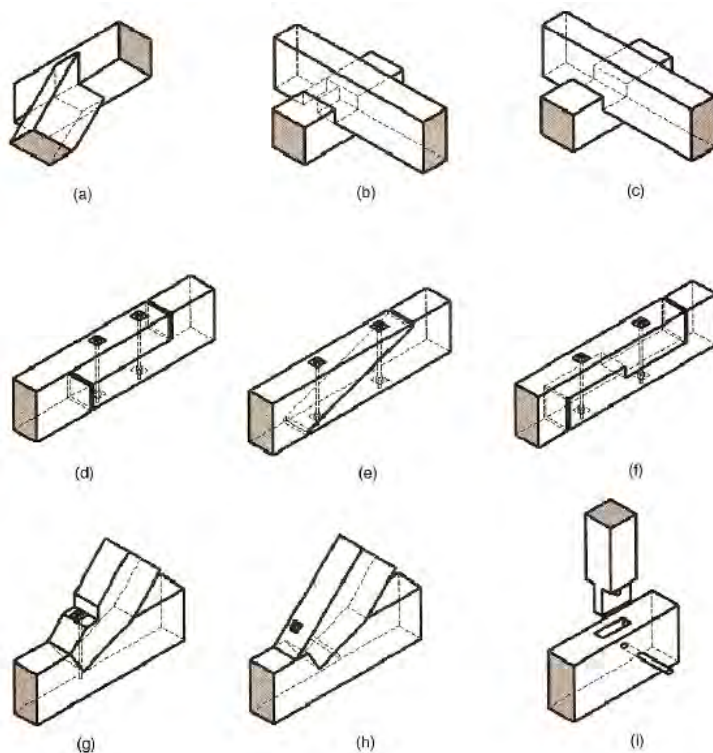


Figura 2.1 - Exemplos de ligações tradicionais de madeira (Larsen 2003)

Em estruturas tradicionais de madeira as ligações, nomeadamente nas asnas, são normalmente materializadas por ligações tipo entalhe, estas podem ser de dente simples ou de dente duplo (Figura 2.2). A ligação absorve a componente horizontal do esforço axial do elemento oblíquo, através da compressão do dente frontal e pelas tensões tangenciais na superfície de contacto (Palma and Cruz 2007).

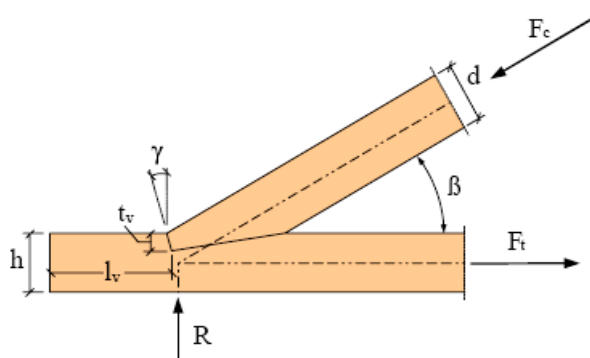


Figura 2.2 - Diagrama de forças numa ligação por entalhe de dente simples (Palma and Cruz 2007)

De forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados são normalmente adicionados elementos metálicos. O uso destes elementos metálicos, para além de prevenir as deformações no plano ortogonal à estrutura, tem o objectivo de garantir a estabilidade da ligação frente a forças cíclicas (inversão de esforços). Nas zonas sísmicas, em particular, o reforço pode prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados. Braçadeiras, esquadros e varões metálicos representam as soluções de reforço mais vulgares em ligações tradicionais de madeira (Branco, Cruz et al. 2006).

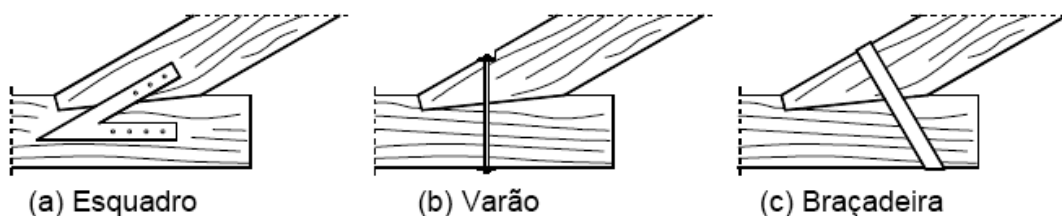


Figura 2.3 - Três tipos de soluções de reforço (Branco, Cruz et al. 2006)

2.3 Ligações Coladas

Neste tipo de ligações são utilizados adesivos para a transmissão dos esforços. Como exemplos temos a madeira lamelada colada e ligações rígidas mediante barras coladas. Este tipo de tecnologia associada a adesivos tem tido um papel importante no incremento do uso de ligações coladas em detrimento de ligações mecânicas na reabilitação de estruturas de madeira. Este aumento está relacionado com as suas vantagens, como o facto de conseguir distribuir a carga aplicada por toda a superfície de contacto e com uma maior

distribuição das tensões, provoca nenhum ou pouco dano nos elementos a ligar, adiciona pouco peso à estrutura global, tem uma resistência à fadiga superior a qualquer outro tipo de ligação, permite ligar diferentes materiais e pode reduzir os custos de manufactura. Apesar de oferecerem bastantes vantagens também apresentam algumas limitações, aí se incluem a necessidade de preparação cuidada da superfície de contacto, para uma boa aderência, alguns adesivos perdem resistência a temperaturas elevadas, são afectados por condições ambientais e é difícil a inspecção e reparação (Custódio, Broughton et al. 2009).

Este tipo de ligação também apresenta limitações na questão do dimensionamento, de modo a prever a capacidade de carga da ligação. A análise da resistência da ligação para aplicações em estruturas de madeira é essencialmente baseada em testes experimentais. Existem algumas fórmulas analíticas provenientes de alguns estudos já desenvolvidos, mas ainda com muitas carências (Aicher 2003).



Figura 2.4 - Exemplo de uma ligação colada

2.4 Ligações Mecânicas

Neste tipo de ligação utilizam-se ferragens para a transmissão de esforços (pregos, parafusos, cavilhas, ...). Dentro destas existem dois tipos de modo de ligação em função do modo de transmissão dos esforços (Arguelles and Martitegui 2000).

O primeiro se denomina de *tipo cavilha* e corresponde aos pregos, parafusos de enroscar, parafusos de porca, cavilhas e pinos. O esforço transmite-se de uma peça para a outra por flexão e corte do ligador e por tensões de corte na madeira. O segundo tipo denomina-se de

superfície, onde os esforços se transmitem por distribuição numa maior área de contacto, podendo assim transmitir maiores cargas. São exemplos deste tipo de ligação as placas circulares denteadas e os anéis metálicos.

2.4.1 Ligadores “tipo cavilha”

A designação de ligadores do *tipo cavilha*, resultante da terminologia britânica “Dowel-type connectors”, é aplicada a ligadores com características geométricas idênticas e cujo comportamento, quando sujeitos a acções numa ligação, é passível de ser descrito por modelos similares.

Pregos, parafusos de enroscar, parafusos de porca, cavilhas e outros tipos de ligadores cuja forma geométrica seja cilíndrica e com o comprimento bastante superior ao diâmetro, têm características de funcionamento idênticas e, portanto, podem ser englobados na designação global de ligadores *tipo cavilha*, para efeitos de cálculo, salvaguardando disposições construtivas particulares (Mendes 1994).

De seguida é analisado mais ao pormenor este tipo de ligadores:

- Pregos

Os pregos constituem o método de ligação mais comum entre elementos de madeira. Comercializam-se numa variada gama de tamanhos, formas e diâmetros. Existem vários tipos de formas disponíveis, a mais comum são os pregos lisos, mas também podemos encontrar pregos com frisos e com forma helicoidal, como é visível na Figura 2.5. Normalmente tem uma secção circular com diâmetros entre 2mm a 8mm e um comprimento entre 30mm a 180mm. O material usado para a fabricação dos pregos é normalmente o aço, podendo este ser aço inoxidável. Os pregos lisos de aço são produzidos por trabalho a frio de arame que resulta em resistências elevadas, o Eurocódigo 5 indica como resistência à tracção de referência mínima de 600 MPa (Larsen 2003).

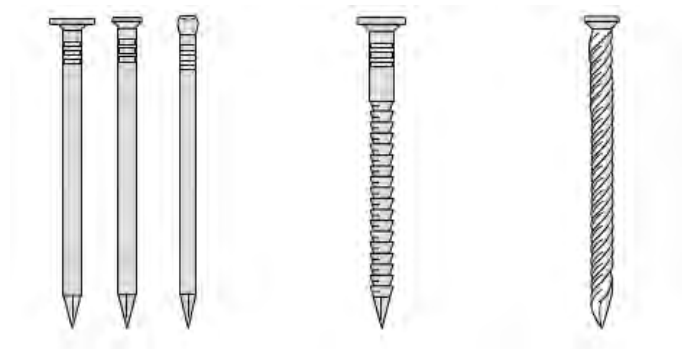


Figura 2.5 – Tipos de pregos

As ligações pregadas são simples de executar e apropriadas para estruturas sujeitas a cargas leves e a ligações formadas por elementos de pouca espessura, onde são bastante efectivos e relativamente baratos.

O desempenho dos pregos, tanto à resistência lateral como ao arrancamento pode ser melhorada pela deformação mecânica do prego liso, criando-lhe frisos circulares ou helicoidais. Estes novos tipos de pregos vêm melhorado principalmente a resistência ao arrancamento quando comparado com os pregos lisos.

- Parafusos de Enroscar

Os parafusos de enroscar são usados no lugar dos pregos em aplicações que requerem maiores capacidades e onde a resistência ao arrancamento for um factor importante. Eles podem ser usados em ligações madeira-madeira, mas são especialmente adequados a ligações aço-madeira e a ligações derivados de madeira-madeira. São constituídos por um fuste com uma zona roscada na ponta e um tramo liso e com diâmetros que variam entre 6 e 20 mm e comprimentos entre 25 e 300 mm (Figura 2.6).

Quando usados em ligações entre madeira branda e o seu diâmetro, d , é igual ou inferior a 6mm, não é necessária pré-furação. Quando o diâmetro é maior que 6 mm, em ligações de madeira branda e em qualquer diâmetro em ligações de madeira dura, é necessário pré-furação, conforme o disposto no EC 5 (EN1995-1-1 2004):

- O buraco para a parte lisa deve ter um diâmetro e comprimento igual ao dessa parte.
- O buraco para a parte roscada deve ter um diâmetro de aproximadamente 70% do diâmetro da parte lisa.

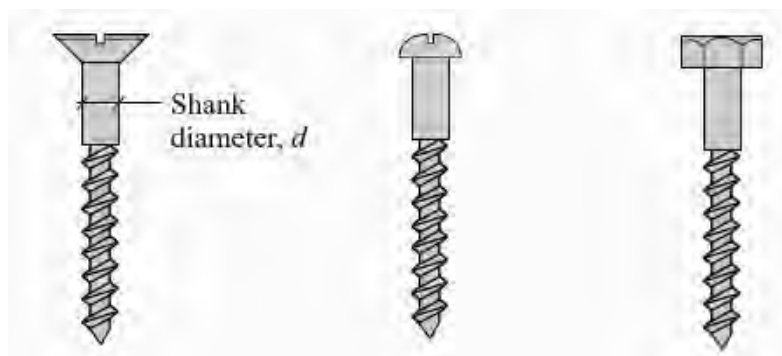


Figura 2.6 – Tipos de Parafuso de Enroscar

- Parafusos de Porca

Os parafusos de porca são constituídos por uma cabeça hexagonal ou semi-esférica e uma porca hexagonal com diâmetros que variam de 12 a 30 mm (Figura 2.7). São usados principalmente em ligações que requerem resistências ao corte maiores que as possíveis com o uso de pregos ou parafusos de enroscar.

Podem ser usados em ligações entre dois elementos mas é comum ligarem três ou mais elementos, onde os elementos laterais podem ser tanto de madeira como de aço. Para facilitar a sua colocação, o EC 5 admite que o diâmetro do buraco de pré-furação pode ser até 1mm maior que o do próprio parafuso.

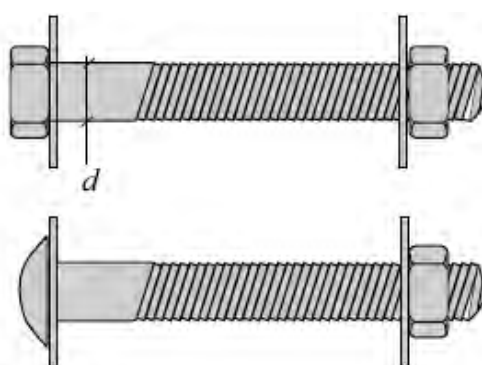


Figura 2.7 – Configurações típicas de parafusos de porca

- Cavilhas

As cavilhas são barras cilíndricas geralmente de aço, com diâmetros da ordem dos 16 a 25 mm e tem ambas as extremidades biseladas (Figura 2.8). Tal como os parafusos de porca,

as cavilhas são usadas para ligações que requerem consideráveis resistências de corte, contudo não podem ser usadas em ligações que transmitam forças de arrancamento.

As cavilhas são utilizadas em vez dos parafusos de modo a se conseguir uma melhor estética. O buraco da pré-furação onde depois é alojada a cavilha não deve ter um diâmetro superior a esta, antes pelo contrário deve ser ligeiramente inferior (0,8 a 1 mm), introduzindo-se assim uma certa pressão que dá uma maior eficácia na transmissão dos esforços.



Figura 2.8 – Configuração típica de cavilha

2.4.2 Conectores

Um conector é um elemento de fixação de forma circular ou rectangular que se introduz ajustado entre dois elementos de madeira e fixos por um parafuso que as atravessa. A carga transmite-se por tensões de esmagamento entre a madeira e o conector. Os conectores utilizam-se para a transmissão de cargas mais elevadas e em peças de maior dimensão, onde um conector pode substituir vários elementos de tipo cavilha.

Segundo a norma (UNE EN 912), os conectores apresentam a seguinte classificação:

- Tipo A: Conectores de anel
- Tipo B: Conectores de placa
- Tipo C: Conectores dentados
- Tipo D: Conectores de madeira

Dos tipos referidos são alvo de estudo nesta dissertação, os conectores abordados pelo Eurocódigo 5, nomeadamente os anéis metálicos (tipo A), as placas metálicas (tipo B) e as placas denteadas (tipo C).

- Placas Denteadas

As placas denteadas estão disponíveis fundamentalmente em formas circulares, octogonais, quadradas e com tamanhos a variar entre 38 a 165mm. Existem 11 tipos de conectores deste tipo e que são referidos como C1, C2, ..., C11, cada um caracterizado pela sua forma, pelo material e se é de única ou dupla face. Os conectores de uma só face são usados principalmente em ligações madeira-aço ou em ligações madeira-madeira, que tenham como imposição serem desmontáveis, os conectores de dupla face são adequados a ligações madeira-madeira, sem imposição de serem desmontáveis (Figura 2.9).

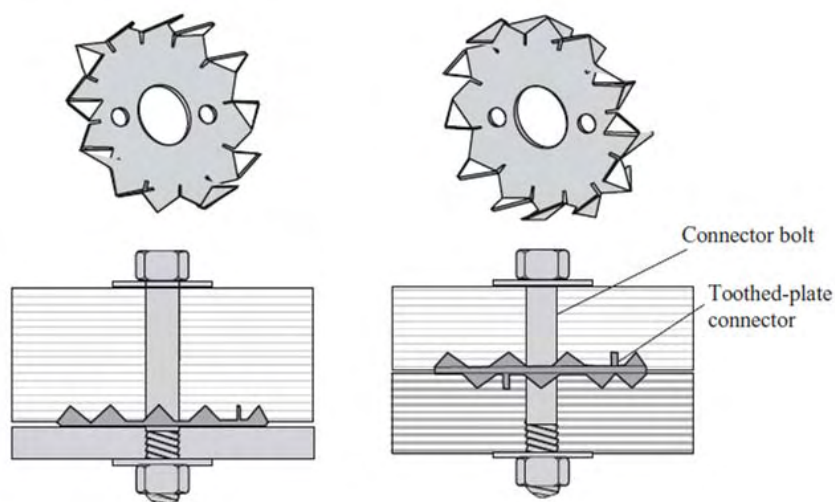


Figura 2.9 – Placas denteadas (À esq. Placa de uma face, à dir. Placa de dupla face)

-Anéis Metálicos

Os anéis metálicos são conectores em forma circular e são construídos em liga de alumínio ou aço. Estes são alojados no interior das peças de madeira a unir, através de entalhes pré-executados e são capazes de suportar maiores cargas do que as placas denteadas. O seu diâmetro varia entre 60 a 260mm e são conectores usados apenas em ligações madeira-madeira (Figura 2.10). Os conectores são fixos por um parafuso e ao contrário das placas denteadas, os parafusos não contribuem para a resistência lateral da ligação. A função do parafuso é assegurar que o ligador se mantém na posição correcta entre os elementos de madeira.

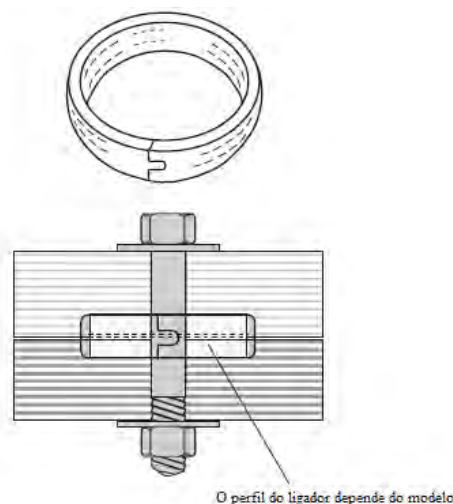


Figura 2.10 – Anel Metálico

- Placas Metálicas

Tal como os anéis, as placas são de forma circular, com diâmetros disponíveis entre 65 a 190 mm e são fixos por um parafuso através do orifício central (Figura 2.11). São usados quando é requerido uma ligação madeira-aço ou uma ligação madeira-betão, e quando a ligação é desmontável.

Neste tipo de conectores a tensão de corte do parafuso é um elemento chave na transferência da carga lateral através da ligação, mas porque essa tensão de corte do parafuso excede sempre a resistência lateral do conector, o EC5 não impõe essa verificação. Assim, tal como o anel metálico, o parafuso que fixa o conector não contribui para a resistência lateral do conector.

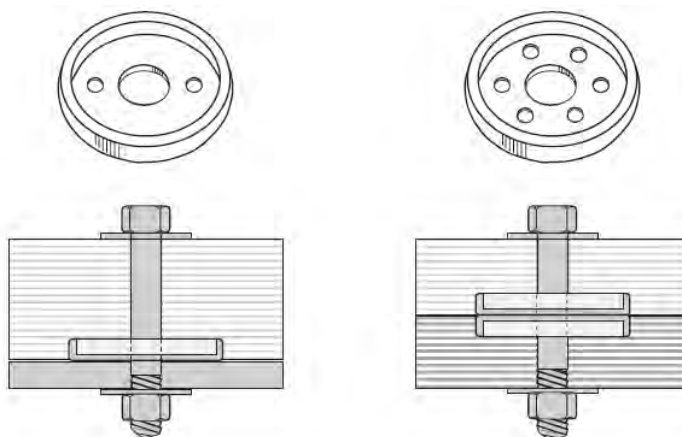


Figura 2.11 – Placas Metálicas em duas configurações possíveis

3 DIMENSIONAMENTO DE LIGAÇÕES

3.1 Capacidade Resistente de ligadores do tipo cavilha

Quando sujeita a acções laterais, a ligação formada por ligadores metálicos pode falhar por um modo dúctil, caracterizado pela flexão do ligador e/ou esmagamento da madeira, ou de uma maneira frágil, caracterizada por fracturas na madeira. As regras de dimensionamento preconizadas pelo EC5 (EN1995-1-1 2004) asseguram que essa rotura seja dúctil ao invés de frágil.

O próprio nome ‘cavilha’ é o termo genérico dado a um ligador que transfere a carga entre os elementos ligados, por uma combinação de flexão e corte do ligador e corte e esmagamento na madeira.

A teoria geral para prever o valor da capacidade de carga em ligações de madeira de ligadores tipo cavilha, com a carga a actuar perpendicularmente ao eixo do ligador foi desenvolvida por Johansen (1949). As equações propostas por ele permitem obter o valor da capacidade de carga, considerando que a rotura se dá por esmagamento na madeira ou por formação de rótulas plásticas no centro da ligação, causadas por um momento flector. A teoria de Johansen é baseada no conceito de que tanto a madeira, sujeita a tensões de esmagamento, como o ligador sujeito à flexão se comportam como materiais rígido-plásticos (Blass 2003). Esta consideração simplifica bastante a análise, mas também implica pequenas diferenças no resultado final.

De modo a simular o comportamento mecânico da ligação recorre-se cada vez mais a modelos de elementos finitos (MEF), onde o seu objectivo não é substituir as equações tradicionais presentes no EC5, mas sim servir de complemento a este (González Fueyo, Dominguez et al. 2009) , (Santos, De Jesus et al. 2009) , (Chen, Lee et al. 2003). Com o uso dos MEF tem-se obtido resultados promissores e uma boa correlação com os ensaios experimentais, abrindo boas expectativas para o futuro. Quando comparado com os resultados previstos usando o método de cálculo do EC5, apresenta boas aproximações e revela também o conservadorismo dos valores obtidos usando o EC5 (Sjödín and Serrano 2008).

As equações propostas por Johansen foram modificadas um pouco ao longo do tempo de modo a melhorar os valores obtidos, e são essas fórmulas que agora fazem parte do EC5

para o cálculo da capacidade resistente de ligadores do tipo cavilha sujeitos ao corte. O valor de cálculo da capacidade resistente é dependente da geometria da ligação, da resistência ao esmagamento na madeira (f_h), do valor do momento de cedência plástica do ligador (M_y), e da resistência ao arranque do ligador (F_{ax}). De acordo com o modo de rotura e dependendo se é corte simples ou duplo, o valor é o mínimo dos valores obtidos através das expressões para a situação pretendida.

- a) Ligação madeira-madeira e madeira-derivados de madeira
- b) Ligação aço-madeira

a) Ligação madeira-madeira e madeira-derivados de madeira

O valor de cálculo da capacidade resistente, por plano de corte e por ligador, para ligações madeira-madeira e madeira-derivados de madeira, realizadas com ligadores tipo cavilha deverá ser tomado como o menor dos valores obtidos pelas seguintes expressões (EN1995-1-1 2004):

- Ligações em corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad (1)$$

- Ligações em corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (k) \end{array} \right. \quad (2)$$

Sendo $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$, ou seja a razão entre as tensões de esmagamento em cada peça.

Onde:

$F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador;

t_i é a espessura dos elementos da madeira (de acordo com a Figura 3.1);

$f_{h,i,k}$ é a resistência ao esmagamento característica;

d é o diâmetro do ligador;

$M_{y,Rk}$ é o momento de cedência plástica característico do ligador;

$F_{ax,Rk}$ é a resistência ao arranque característica do ligador;

A cada expressão corresponde um determinado modo de rotura, para corte simples (1) e corte duplo (2):

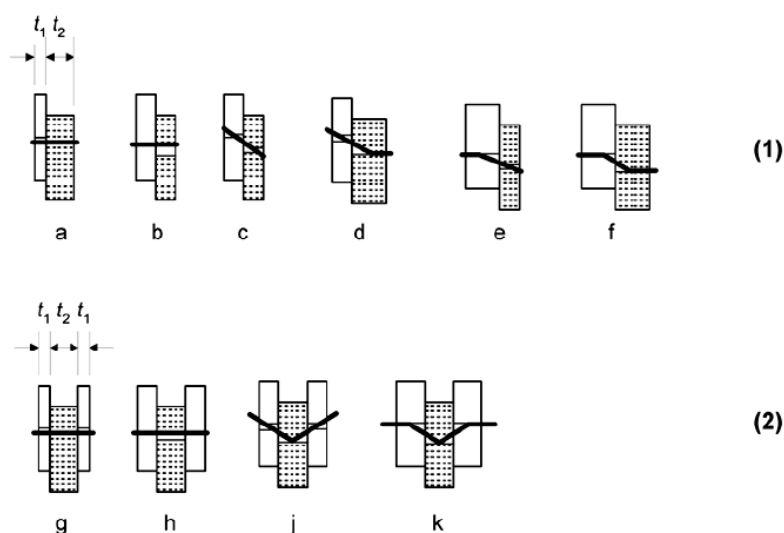


Figura 3.1 – Diferentes modos de rotura (EN1995-1-1 2004)

b) Ligação aço-madeira

O valor da capacidade de carga neste caso depende da espessura das placas metálicas. Placas metálicas com uma espessura menor ou igual a $0,5d$ são classificadas como placas delgadas e placas metálicas com uma espessura maior ou igual a d são classificadas como placas espessas. Assim, o valor de cálculo da capacidade de carga por plano de corte e por ligador, deverá ser tomado como o menor dos valores obtidos pelas seguintes expressões (EN1995-1-1 2004):

- Para placas delgadas em corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4f_{h,k}t_1d \text{ (a)} \\ 1,15\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (b)} \end{array} \right. \quad (3)$$

- Para placas espessas em corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k}t_1d \text{ (c)} \\ f_{h,k}t_1d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (d)} \\ 2,3\sqrt{M_{y,Rk}f_{h,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (e)} \end{array} \right. \quad (4)$$

- Para placas de qualquer espessura, como elemento central, em corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k}t_1d \text{ (f)} \\ f_{h,1,k}t_1d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (g)} \\ 2,3\sqrt{M_{y,Rk}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (h)} \end{array} \right. \quad (5)$$

- Para placas delgadas, como elementos laterais, em corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5f_{h,2,k}t_2d \text{ (j)} \\ 1,15\sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,2,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (k)} \end{array} \right. \quad (6)$$

- Para placas espessas, como elementos laterais, em corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5f_{h,2,k}t_2d \text{ (l)} \\ 2,3\sqrt{M_{y,Rk}f_{h,2,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \text{ (m)} \end{array} \right. \quad (7)$$

Onde:

$F_{v,Rk}$ é a capacidade de carga característica por plano de corte e por ligador;

t_1 é a menor das espessuras dos elementos laterais de madeira ou a profundidade de penetração;

t_2 é a espessura do elemento central de madeira;

$f_{h,i,k}$ é a resistência ao esmagamento característica;

d é o diâmetro do ligador;

$M_{y,Rk}$ é o momento de cedência plástico característico do ligador;

$F_{ax,Rk}$ é a resistência ao arranque característica do ligador;

E para cada expressão o respectivo modo de rotura:

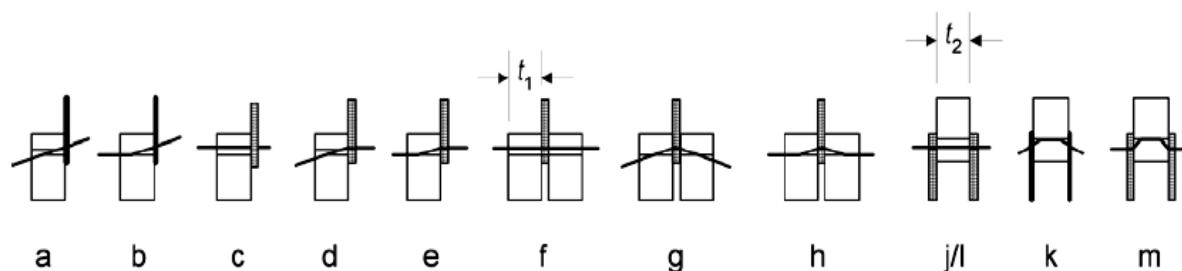


Figura 3.2 – Modos de rotura para corte simples e corte duplo (EN1995-1-1 2004)

3.1.1 Momento de cedência plástica

O momento de cedência plástica ($M_{y,Rk}$) é o momento flector que origina a plastificação completa da secção de um ligador, e foi derivado a partir do produto da tensão de cedência e do módulo elástico do ligador. Foi deduzido com base em ensaios e define expressões para os diferentes tipos de ligadores (Tabela 3-1). Essas expressões dependem da tensão de cedência (f_u) e do diâmetro (d) do ligador metálico.

Tabela 3-1 – Equações do EC5 para o cálculo de $M_{y,Rk}$

Ligador	$M_{y,Rk}$ (N.mm)
Pregos	
Pregos lisos de secção circular	$0.3f_u d^{2.6}$
Pregos lisos de secção quadrada	$0.45f_u d^{2.6}$
Parafusos de porca	$0.3f_u d^{2.6}$
Cavilhas	Igual aos parafusos
Parafusos de enroscar	
Parafusos lisos com $d \leq 6\text{mm}$	Ver pregos
Parafusos lisos com $d > 6\text{mm}$	Ver parafusos de porca

3.1.2 Resistência ao esmagamento

A resistência ao esmagamento ($f_{h,k}$) de um elemento de madeira define-se como a máxima tensão de compressão que a peça pode suportar, exercida por um elemento linear que atravessa a secção. Esta resistência é determinada através de ensaios de compressão

paralela e perpendicular às fibras da madeira e tem o objectivo de produzir uma base de dados para o dimensionamento de ligadores metálicos (Sawata and Yasumura 2002) (Figura 3.3).

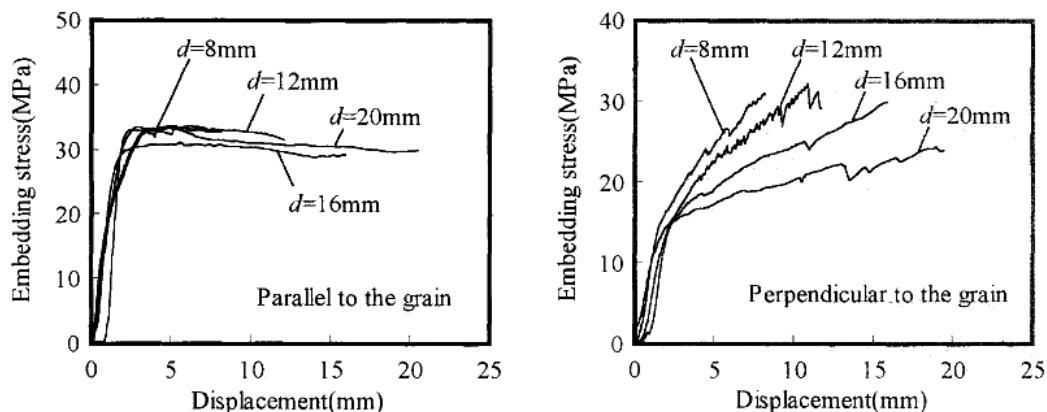


Figura 3.3 – Relação entre a tensão de esmagamento e a deformação em parafusos (Sawata and Yasumura 2002)

A outra possibilidade e sem a necessidade de recorrer a ensaios, é usar as expressões deduzidas com base em testes e relações empíricas, e que dependem do diâmetro do ligador e da densidade característica da madeira (ρ_k). Este é o método adoptado pelo EC5 e que utiliza expressões para cada tipo de ligador (ver Tabelas 3-2 e 3-3). No caso dos parafusos de enroscar aplica-se a tabela dos pregos, caso o diâmetro seja menor ou igual a 6mm, e a tabela dos parafusos de porca, caso o diâmetro seja superior a 6mm.

Tabela 3-2 - Equações do EC5 para o cálculo de f_{hk} em pregos e parafusos de enroscar com $d \leq 6mm$

Condição	f_{hk} (N/mm ²)
Para ligações em madeira ou LVL com pregos até 8mm	
Sem pré-furação	$0.082\rho_k d^{-0.3}$
Com pré-furação	$0.082(1 - 0.01d)\rho_k$
Para ligações em madeira ou LVL com pregos maiores que 8mm	Aplicam-se expressões parafusos
Para ligações de madeira-derivados de madeira com pregos com um diâmetro de cabeça de pelo menos 2d e em que o derivado de madeira é:	
Contraplacado	$0.11\rho_k d^{-0.3}$
Aglomerado de fibras duro	$30d^{-0.3}t^{0.6}$
Aglomerado de partículas ou OSB	$65d^{-0.7}t^{0.1}$

Tabela 3-3 - Equações do EC5 para o cálculo de f_{hk} em parafusos de porca, cavilhas e em parafusos de enroscar com $d > 6mm$

Condição	f_{hK} (N/mm ²)
Para madeira e LVL	
Esforço paralelo às fibras	$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k$
Esforço perpendicular às fibras	$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{K_{90}\text{sen}\alpha^2 + \text{cos}\alpha^2}$
Para ligações madeira-derivados de madeira para qualquer ângulo em relação às fibras, em que o derivado de madeira é:	
Contraplacado	$f_{h,\alpha,k} = 0.11(1 - 0.01d)\rho_k$
Aglomerado partículas ou OSB	$f_{h,\alpha,k} = 50d^{-0.6}t^{0.2}$

3.1.3 Resistência axial dos ligadores

A resistência ao arranque dos ligadores (F_{ax}), é também um factor que entra nas fórmulas de cálculo da capacidade resistente dos ligadores. Segundo essas expressões, atrás descritas, o primeiro termo corresponde à capacidade resistente lateral de acordo com a teoria de Johansen e o segundo termo ($F_{ax}/4$) corresponde à contribuição do efeito de arranque nos ligadores. Esta contribuição deve ser limitada de acordo com as seguintes percentagens em relação ao primeiro termo:

- Pregos redondos: 15%
- Pregos quadrados: 25%
- Outros pregos: 50%
- Parafusos de enroscar: 100%
- Parafusos de porca: 25%
- Cavilhas: 0%

A Tabela 3-4 contém as expressões de cálculo, de acordo com o tipo de ligador, pregos, parafusos de enroscar e parafusos de porca, quando sujeitos ao arranque. As cavilhas não oferecem resistência ao arranque e portanto $F_{ax,Rk}=0$.

Tabela 3-4 – Resistência ao arranque dos ligadores

Ligador	Resistência ao arranque ($F_{ax,Rk}$)
Pregos	<p>-Para pregos não lisos, de acordo com a EN 14592:</p> $F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{head,k} d_h^2 \end{cases}$ <p>Com,</p> $f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2$ $f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2$ <p>-Para Pregos lisos:</p> $F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} dt_{pen} \\ f_{ax,k} dt + f_{head,k} d_h^2 \end{cases}$ <p>t_{pen}: comprimento de penetração t: espessura cobrejuntas d_h: diâmetro da cabeça do prego</p>
Parafusos de enroscar	<p>A resistência característica ao arranque, de acordo com o ângulo α às fibras:</p> $F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} (\pi d l_{ef})^{0,8} f_{ax,\alpha,k}$ <p>Com,</p> <p>n_{ef}: nº efectivo de parafusos</p> <p>l_{ef}: comprimento de penetração da parte roscada</p> <p>d: diâmetro exterior da parte roscada</p> <p>$f_{ax,\alpha,k}$: Força característica de arranque num ângulo α às fibras</p> $f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha}$ <p>$f_{ax,k}$: Força característica perpendicular às fibras</p> $f_{ax,k} = 3,6 \times 10^{-3} \rho_k^{1,5}$
Parafusos de porca	<p>O valor da resistência ao arranque deve ser tomado como o menor valor de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistência à tracção do parafuso - A resistência à compressão da anilha, ou da placa metálica em ligações aço-madeira <p>O valor de cálculo da tensão de compressão aplicada à madeira pela anilha não deve exceder $1,8 f_{c,90,k}$.</p>

3.2 Capacidade resistente de conectores

No caso dos conectores o valor característico da capacidade de carga ($F_{V,Rk}$) é determinado com base em ensaios nas ligações. De modo a garantir que não ocorre uma rotura frágil a mínima espessura das peças permitida é:

- Elementos madeira exteriores: $2.25 h_e$

- Elementos madeira interiores: $3.75 h_e$

Onde h_e é a profundidade de penetração do conector.

Para anéis metálicos (conector tipo A) e placas metálicas (conector tipo B) e com um diâmetro inferior a 200 mm, o valor característico da capacidade de carga $F_{V,0,Rk}$ segundo o EC5, por conector e por plano de corte é obtido pela seguinte expressão:

$$F_{V,0,Rk} = \min \begin{cases} k_1 k_2 k_3 k_4 (35 d_c^{1.5}) & (a) \\ k_1 k_3 h_e (31.5 d_c) & (b) \end{cases} \quad (8)$$

(a) Rotura por corte

(b) Rotura por esmagamento

- d_c : é o diâmetro do conector de acordo com o tipo, em mm;

- k_i : são factores de modificação, que tem em conta o efeito da espessura do elemento (ver Tabela 3-5);

- h_e : é o comprimento de penetração, em mm;

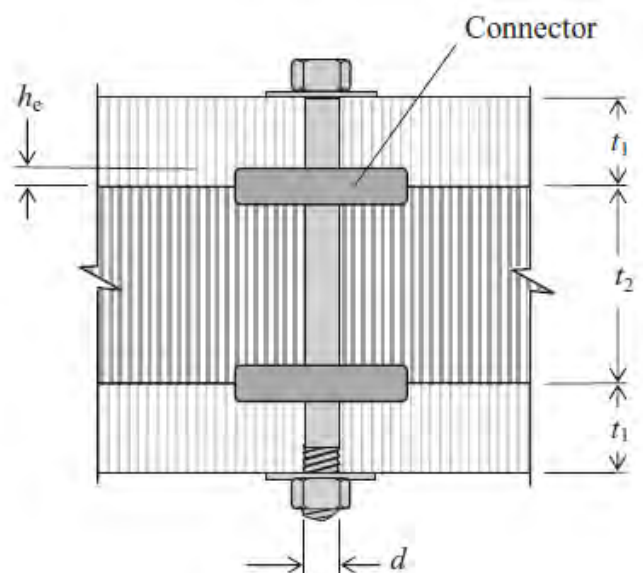


Figura 3.4 – Dimensões relevantes para ligações anéis ou placas metálicas

Para placas denteadas (conector tipo C), conforme representado na Figura 3.5, o valor de $F_{V,Rk}$, segundo o EC5 é dado pela seguinte expressão:

$$F_{V,Rk} = \begin{cases} 18 k_1 k_2 k_3 d_c^{1.5} & (a) \\ 25 k_1 k_2 k_3 d_c^{1.5} & (b) \end{cases} \quad (9)$$

(a) Para placas de única face (tipo C2,C4,C7,C9,C11)

(b) Para placas de dupla face (tipo C1.C3,C5,C6,C8,C10)

- Valores de k_i dados pela Tabela 3-5;

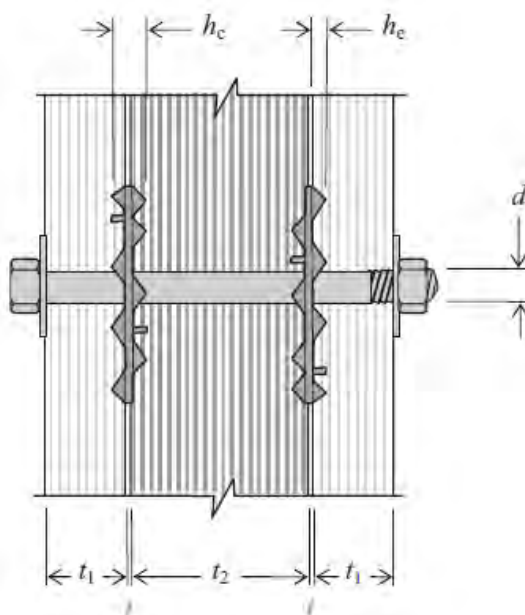


Figura 3.5 – Dimensões para ligações com placas denteadas

Tabela 3-5 – Factores k_i

	Placa denteada	Anéis metálicos e Placas metálicas
k_1	$\min\left(1; \frac{t_1}{3h_e}; \frac{t_2}{5h_e}\right)$	$\min\left(1; \frac{t_1}{3h_e}; \frac{t_2}{5h_e}\right)$
k_2	<p>Para tipo C1 a C9: $\min\left(1; \frac{a_{3,t}}{1,5d_c}\right)$ $a_{3,t} = \max(1,1d_c; 7d; 80mm)$</p> <p>Para tipos C10 e C11: $\min\left(1; \frac{a_{3,t}}{2,0d_c}\right)$ $a_{3,t} = \max(1,5d_c; 7d; 80mm)$</p>	<p>$\min\left(k_a; \frac{a_{3,t}}{2,0d_c}\right)$ Onde, $k_a=1,25$, para ligações com um conector por plano de corte; $k_a=1$, para ligações com mais do que um ligador por plano de corte; $a_{3,t}$: distância mínima ao topo</p>
k_3	$\min\left(1,5; \frac{\rho_k}{350}\right)$	$\min\left(1,75; \frac{\rho_k}{350}\right)$
k_4	-	<p>1,0: para ligações madeira-madeira 1,1: para ligações aço-madeira</p>

3.3 Disposições Construtivas

As equações de Johansen presentes no EC5, só são válidas se não existir fractura na madeira, resultando numa rotura frágil. Um dos importantes princípios do dimensionamento de estruturas de madeira é evitar roturas frágeis nas ligações (Echavarria and Salenikovich 2008), que à medida que a carga aumenta, a deformação e a área de

contacto entre a madeira e o ligador aumentam, e a rotura é causada por uma combinação de corte e tensão perpendicular às fibras (Kharouf, McClure et al. 2003). No EC5, este risco é considerado pela introdução de algumas regras de base empírica, como distâncias mínimas ao bordo e ao topo dos elementos de madeira e espaçamentos entre ligadores. Diversas experiências tem sido desenvolvidas envolvendo modelos em elementos finitos (Daudeville, Davenne et al. 1999) e (Serrano and Gustafsson 2007), de modo a que sejam revistas as regras de dimensionamento e ter em linha de conta com possíveis fissuras e parâmetros estruturais. De modo a evitar a fissuração na madeira também é necessário ter alguns cuidados tais como, quando são usados pregos ou parafusos de enroscar com diâmetro maior que 6mm, é necessário uma pré-furação na madeira. Esta pré-furação convém ser realizada também sempre que a madeira seja densa.

3.3.1 Espaçamentos e distâncias mínimas

O Eurocódigo 5 define seis parâmetros que permitem estabelecer, para cada tipo de ligador mecânico, as distâncias mínimas e os afastamentos mínimos recomendáveis (Figuras 3.6 e 3.7):

a_1 – afastamento mínimo na direcção paralela ao fio

a_2 – afastamento mínimo na direcção perpendicular ao fio

$a_{3,t}$ – distância mínima ao topo carregado

$a_{3,c}$ – distância mínima ao topo não carregado

$a_{4,t}$ – distância mínima ao bordo carregado

$a_{4,c}$ – distância mínima ao bordo não carregado

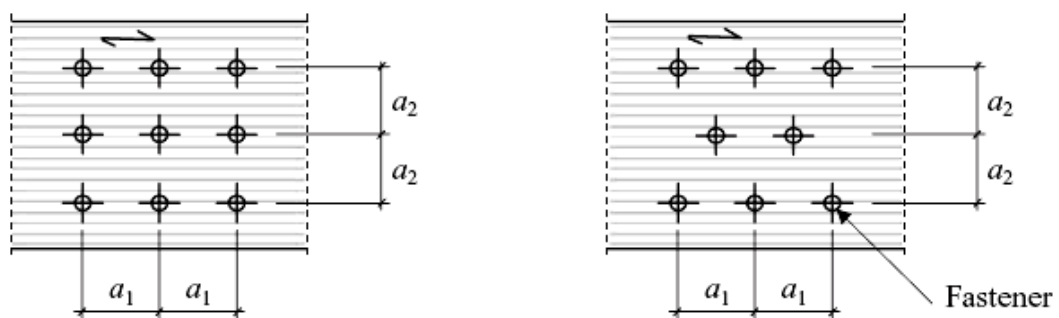


Figura 3.6 - Afastamentos mínimos

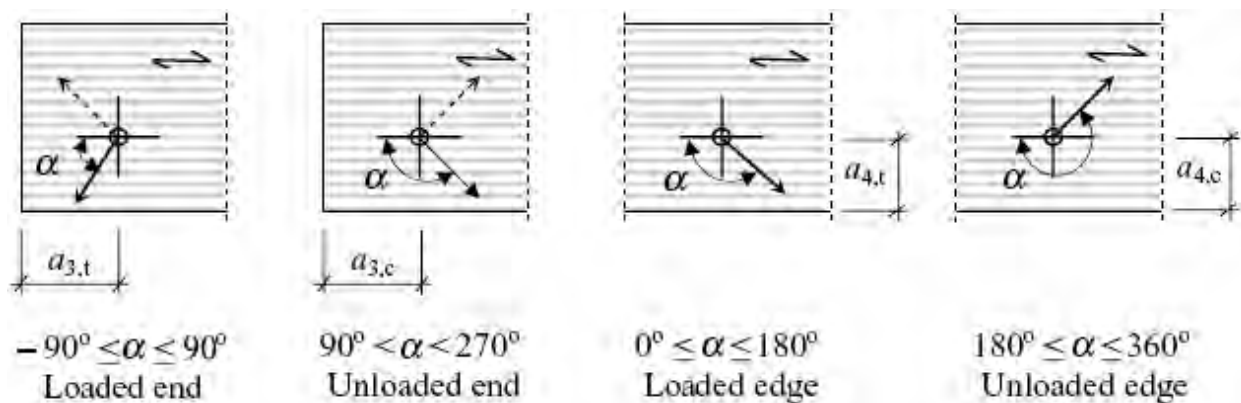


Figura 3.7 - Distâncias ao topo e ao bordo (α é o ângulo formado pela direcção do esforço com o fio da madeira)

Na tabela 3-6 são apresentados os espaçamentos e as distâncias ao topo e ao bordo mínimas, para os ligadores pregos, parafusos de porca, cavilhas, e conectores, placas denteadas e anéis e placas metálicas. No caso dos parafusos de enroscar, para um diâmetro maior que 6mm aplica-se o disposto para os parafusos de porca, para um diâmetro menor ou igual a 6mm aplica-se o disposto para pregos.

Tabela 3-6 – Espaçamentos e distâncias mínimas para ligadores e conectores

Espaçamentos e distâncias	Pregos			Parafusos de porca	Cavilhas	Placas denteadas		Anéis e placas metálicos
	Sem pré-furação		Com pré-furação			Tipo C1 a C9	Tipo C10 e C11	
	$\rho_k \leq 420$ Kg/m³	$420 < \rho_k \leq 500$ Kg/m³						
a_1 $0^\circ \leq \alpha \leq 360$	d<5mm: (5+5 cosα)d d≥5mm: (5+7 cosα)d	(7+8 cosα)d	(4+ cosα)d	(4+ cosα)d	(3+2 cosα)d	(1.2+0.3 cosα)dc	(1.2+0.8 cosα)dc	(1.2+0.8 cosα)dc
a_2 $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5d	7d	(3+ senα)d	4d	3d	1.2dc	1.2dc	1.2dc
$a_{3,t}$ $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	(10+5cosα)d	(15+5cosα)d	(7+5cosα)d	max(7d;80mm)	max(7d;80mm)	2.0dc	2.0dc	1.5dc
$a_{3,c}$ $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	10d	15d	7d	(1+6senα)d	max[($a_{3,t}$ senα)d;3d]	(0.9+0.6 senα)dc	(0.4+1.6 senα)dc	(0.4+1.6 senα)dc
$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$				4d	3d	1.2dc	1.2dc	1.2dc
$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$				(1+6senα)d	max[($a_{3,t}$ senα)d;3d]	(0.9+0.6 senα)dc	(0.4+1.6 senα)dc	(0.4+1.6 senα)dc
$a_{4,t}$ $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	d<5mm: (5+2senα)d d≥5mm: (5+5senα)d	d<5mm: (7+2senα)d d≥5mm: (7+5sensα)d	d<5mm: (3+2senα)d d≥5mm: (3+4senα)d	max[(2+2senα)d;3d]	max[(2+2senα)d;3d]	(0.6+0.2 senα)dc	(0.6+0.2 senα)dc	(0.6+0.2 senα)dc
$a_{4,c}$ $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	5d	7d	3d	3d	3d	0.6dc	0.6dc	0.6dc

3.3.2 Ligações com ligadores múltiplos

As ligações usualmente são constituídas por mais que um ligador. Em condições óptimas, cada ligador individual atinge a sua carga máxima antes da rotura e a capacidade de carga total da ligação corresponde à soma das capacidades de carga individuais de cada ligador. Na realidade isso não acontece devido ao efeito de linha dos ligadores na direcção paralela às fibras, e portanto a capacidade de carga da ligação é inferior à soma de cada capacidade de carga individual de cada ligador.

O cálculo da capacidade de carga da ligação é assim definido em duas direcções:

- Na direcção perpendicular às fibras, considerando r o número de filas:

$$F_{v,Rk}(ligação) = r \times F_{v,Rk}(ligador) \quad (10)$$

- Na direcção paralela às fibras:

$$F_{v,ef,Rk}(ligação) = n_{ef} \times F_{v,Rk}(ligador) \quad (11)$$

De acordo com o ligador, o número efectivo de ligadores por fila, n_{ef} , é dado pelas expressões da Tabela 3-7:

Tabela 3-7 – Número efectivo de ligadores

Ligador	n_{ef} de ligadores p/ fila		
Pregos	$n_{ef} = n^{K_{ef}}$ Com K_{ef} dado por:		
	espaçamento	Com pré-furação	Sem pré-furação
	$a_1=14d$	1.0	1.0
	$a_1=12d$	0.925	0.925
	$a_1=10d$	0.85	0.85
	$a_1=9d$	0.8	0.8
	$a_1=8d$	0.75	0.75
	$a_1=7d$	0.7	0.7
	$a_1=4d$	0.5	-
Parafusos e cavilhas	$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,94} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \right\}$ a_1 : é o espaçamento na direcção das fibras n : número de parafusos ou cavilhas numa linha		
Conectores	$n_{ef} = 2 + \left(1 - \frac{n}{20} \right) (n - 2)$ n : número de conectores numa linha paralela às fibras		

4 DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE LIGAÇÕES

4.1 Aspectos Gerais

A parte 1-2 do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2 2004) relativa ao cálculo ao fogo, define para cada material os procedimentos relativos, à determinação dos valores de cálculo para a situação de incêndio, para propriedades dos materiais e resistências, e para métodos de verificação.

Os requerimentos básicos para o dimensionamento ao fogo prendem-se com o facto de que, onde a resistência mecânica em situação de incêndio é requerida, a sua função resistente se mantenha durante o tempo relevante de exposição ao incêndio. E o mesmo se aplica a elementos que formam a fronteira de um compartimento resistente ao fogo, incluindo as ligações, que devem ser dimensionados de modo a que mantenham a sua função resistente separada, durante o tempo de exposição ao incêndio.

4.1.1 Valores de cálculo das propriedades dos materiais e das resistências

Os valores de cálculo das propriedades dos materiais é dado por:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (12)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (13)$$

Onde,

$f_{d,fi}$: Esforço de cálculo ao fogo (Ex: um esforço de momento, um esforço de compressão, etc., nos elementos de madeira);

$S_{d,fi}$: Valor de cálculo ao fogo de uma propriedade de rigidez (Ex: módulo de elasticidade longitudinal, $E_{d,fi}$, ou o módulo de elasticidade transversal, $G_{d,fi}$);

f_{20} : Quantil 20% da propriedade de esforço considerado;

S_{20} : Quantil 20% da propriedade de rigidez considerada;

$k_{mod,fi}$: factor de modificação para fogo;

$\gamma_{M,fi}$: Factor parcial de segurança para a madeira ao fogo (O valor recomendado é $\gamma_{M,fi}=1$);

O valor de cálculo $R_{d,fi}$, de uma resistência mecânica em situação de incêndio é dado por:

$$R_{d,fi} = \eta \frac{R_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (14)$$

Onde,

η : é um factor de conversão

Os Quantilhos 20% que entram nas fórmulas acima descritas para esforços, propriedades de rigidez e para resistência mecânica, são calculados usando as seguintes fórmulas:

$$f_{20} = k_{fi} f_k \quad (15)$$

$$S_{20} = k_{fi} S_{05} \quad (16)$$

$$R_{20} = k_{fi} R_k \quad (17)$$

Os valores de k_{fi} são dados pela Tabela 4-1:

Tabela 4-1 – Valores de k_{fi}

	k_{fi}
Madeira maciça	1,25
Madeira lamelada colada	1,15
Painéis de derivados de madeira	1,15
LVL (“laminated veneer lumber”)	1,1
Ligações com ligadores em corte, com elementos laterais de madeira ou derivados de madeira	1,15
Ligações com ligadores em corte, com elementos laterais de aço	1,05
Ligações com ligadores sujeitos ao arranque	1,05

4.1.2 Métodos de verificação

O Eurocódigo tem como princípio, que a análise estrutural, entre outras coisas, deve considerar modelos para a evolução da temperatura, como também modelos para o comportamento mecânico da estrutura a elevada temperatura. O modelo de aplicação, satisfazendo este princípio, diz que o desempenho requerido deve ser verificado tanto por

uma análise global, como uma análise da subestrutura, ou uma análise do elemento (Jürgen 2005).

Deve ser verificada a seguinte condição, para um tempo de exposição t :

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (18)$$

Onde:

$E_{d,fi}$: é o valor de cálculo do efeito das acções para a situação de incêndio, determinada em consideração com o Eurocódigo 1, parte 1-2 (EN1991-1-2 2002), incluindo efeitos de expansões térmicas e deformações;

$R_{d,t,fi}$: é o valor de cálculo da correspondente resistência em situação de incêndio;

O efeito das acções deve ser determinado para um tempo $t=0$, usando os factores de combinação $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$. Como simplificação o efeito das acções $E_{d,fi}$ pode ser obtido a partir de uma análise para temperatura ambiente por:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (19)$$

Onde:

E_d : é o valor de cálculo do efeito das acções para uma temperatura normal, usando a combinação fundamental de acções;

η_{fi} : é o factor de redução para o valor de cálculo em situação de incêndio, e deve ser calculado através da expressão:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{K,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{K,1}} \quad (20)$$

Onde,

$Q_{K,1}$: é o valor característico para a acção variável base;

G_k : é o valor característico para a acção permanente;

γ_G : é o factor parcial para acções permanentes;

$\gamma_{Q,1}$: é o factor parcial para a acção variável 1;

ψ_{fi} : é o factor de combinação para valores frequentes de acções variáveis em situação de incêndio ($\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$);

A Figura 4.1, retirada do Eurocódigo 5, parte 1-2, apresenta um gráfico da variação do factor de redução, n_{fi} , com o rácio $Q_{K,1}/G_K$, para diferentes valores de factores de combinação ψ_{fi} . Assumindo $\gamma_{GA}=1,0$, $\gamma_G=1,35$ e $\gamma_Q=1,5$.

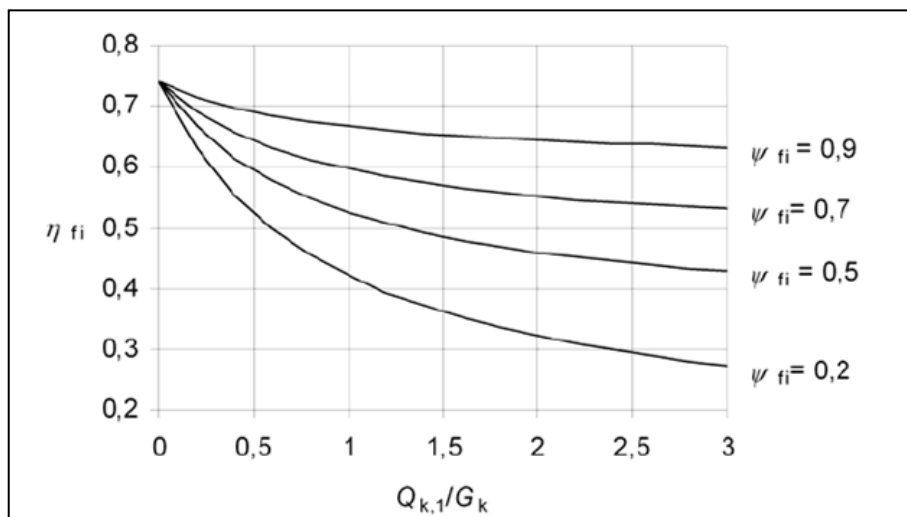


Figura 4.1 – Exemplos da redução do factor n_{fi} versus o rácio de carga $Q_{K,1}/G_K$ (EN1995-1-2 2004)

Também segundo o Eurocódigo 5, como simplificação, o valor recomendado é $n_{fi}=0,6$, excepto para cargas da categoria E (áreas susceptíveis de acumular bens, incluindo áreas de acesso), onde o valor recomendado é $n_{fi}=0,7$.

4.2 Comportamento ao Fogo

Antes de abordar em concreto o modelo de dimensionamento para situação de incêndio definido pelo Eurocódigo 5, é dada uma pequena introdução sobre o comportamento da madeira e dos ligadores ao fogo.

A madeira é um material combustível e nesse aspecto difere da maioria dos outros materiais estruturais. Quando se atinge uma determinada temperatura na madeira ocorre um processo de degradação térmica (pirólise), que produz gases da combustão acompanhada de perda de massa (Figura 4.2) (White 2002). Pela conversão de madeira em carvão, existe uma perda da densidade da madeira. É formada uma camada carbonizada nas faces expostas ao fogo e vai aumentando de espessura durante a actuação do fogo, a taxa de carbonização geralmente refere-se à taxa linear a que a madeira é convertida em carvão. Essa carbonização vai reduzindo assim a secção transversal do elemento de

madeira, que perde propriedades mecânicas. Contudo essa camada carbonizada funciona como um bom isolador protegendo a restante secção não carbonizada contra o calor. É essa secção efectiva que tem de suportar as cargas e manter o desempenho estrutural para a qual foi dimensionada.

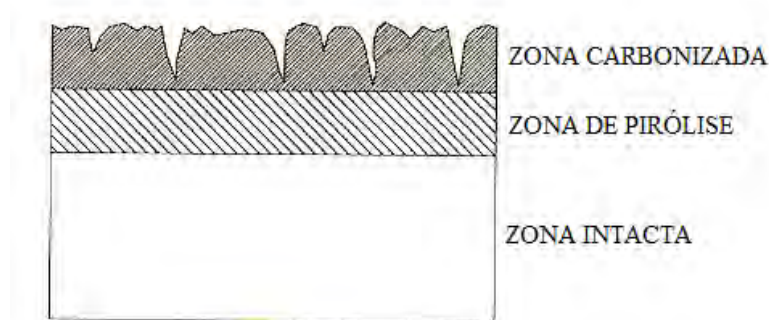


Figura 4.2 – Zonas de degradação numa secção de madeira (Arguelles and Martitegui 2000)

No Eurocódigo 5, parte 1-2, há referências à espessura de carbonização e afirma-se que esta deve ser considerada para todas as superfícies de madeira ou derivados de madeira, directamente expostos ao fogo, e, quando relevante, para superfícies inicialmente protegidas da exposição ao fogo, mas onde a carbonização da madeira ocorre durante um período de tempo relevante de exposição ao fogo.

Para superfícies desprotegidas durante o tempo de exposição ao fogo, existem duas espessuras de carbonização. Como valor básico, a taxa de carbonização, β_0 , representa a transferência de calor unidimensional numa laje semi-infinita de madeira (Figura 4.3), quando exposta a um incêndio padrão (Jürgen 2005). Deve ser considerada constante com o tempo, e a espessura carbonizada deve ser calculada como:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (21)$$

De maneira a simplificar o cálculo das propriedades na secção transversal assume-se uma secção rectangular residual equivalente, e calcula-se a taxa nominal de carbonização, β_n , que implicitamente inclui o efeito dos cantos arredondados e obtém-se aproximadamente os mesmos resultados (Figura 4.3) (Cachim and Franssen). Deve ser considerada constante com o tempo, e a espessura carbonizada deve ser calculada como:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (22)$$

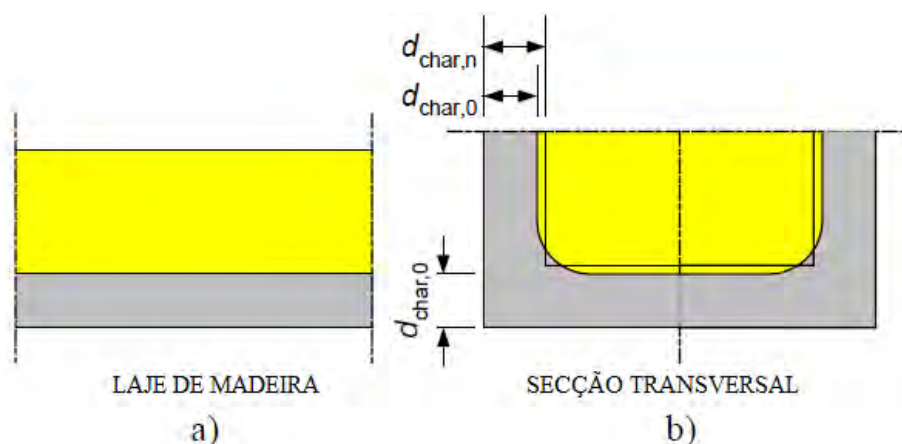


Figura 4.3 – Espessuras de carbonização $d_{char,n}$ e $d_{char,0}$ (Konig and Winter 2004)

Para superfícies de madeira, desprotegidas durante o tempo de exposição ao fogo, os valores de cálculo para as taxas β_0 e β_n são dados na Tabela 4-2:

Tabela 4-2 – Taxas de carbonização β_0 e β_n

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Madeira leve		
Madeira lamelada colada com uma densidade característica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Madeira maciça com uma densidade característica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Madeira dura		
Madeira maciça ou lamelada colada dura, com uma densidade característica de 290 kg/m^3	0,65	0,7
Madeira maciça ou lamelada colada dura, com uma densidade característica $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
com uma densidade característica $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Painéis		
painéis de madeira	0,9 ^a	-
contraplacado	1,0 ^a	-
Outros derivados da madeira	0,9 ^a	-
^a Os valores são aplicados para uma densidade característica de 450 kg/m^3 e para painéis com espessura de 20mm		

Para a determinação das propriedades da secção transversal residual o EC5 parte 1-2, apresenta duas alternativas. Um dos métodos denomina-se método da redução da secção transversal, e consiste no uso das propriedades da secção de madeira efectiva, usando $k_{mod,fi}=1$, nas expressões (12) e (13), mas tem em conta a redução da capacidade resistente nas zonas de fronteira da camada carbonizada, removendo 7mm de espessura à secção residual transversal da madeira, calculada em (22). O outro método denomina-se método da redução das propriedades, e consiste em calcular valores de $k_{mod,fi}$, para esforços de tracção, compressão e momento flector, como também para o módulo de elasticidade, substituídos depois nas expressões (12) e (13).

Sem dúvida o ponto mais débil de uma estrutura de madeira frente ao fogo, são os ligadores utilizados nas ligações. Ao tratar-se de peças metálicas, geralmente expostas ao fogo, por sua elevada condução térmica, perdem rapidamente as suas propriedades mecânicas e facilitam a penetração do fogo dentro das peças. As ligações como parte importante que representam nas estruturas de madeira, devem garantir a mesma resistência ao fogo que os elementos estruturais de madeira (Andrea Frangi 2009). Na Figura 4.4 é mostrado a secção residual de um elemento de madeira, após ter sido testado ao fogo com ligadores metálicos, e é visível o efeito de condução térmica que estes produzem para o interior dos elementos de madeira.



Figura 4.4 – Exemplo de uma secção residual de um elemento de madeira, com ligadores metálicos, exposta ao fogo (Andrea, Carsten et al. 2009)

O EC 5 parte 1-2, tem também um anexo informativo que fornece algumas instruções para o uso de métodos de cálculo avançado, por exemplo, métodos de elementos finitos para

análises térmicas e estruturais de estruturas de madeira. Estes métodos de cálculo avançado podem ser usados para a determinação da profundidade de carbonização, a distribuição da temperatura nos elementos estruturais e a avaliação do comportamento estrutural de toda ou parte da estrutura (Jürgen 2005), (Cachim and Franssen 2009). Pretende-se desenvolver métodos analíticos usando as equações de Johansen de modo a prever a resistência ao fogo em ligações de madeira. A partir das temperaturas obtidas durante os testes é possível ver se as equações de Johansen fornecem uma boa estimativa da resistência ao fogo, quando os parâmetros são adaptados para as condições de fogo (Moss, Buchanan et al. 2009).

As disposições contidas na secção do Eurocódigo 5, parte 1-2, referente às ligações, aplicam-se a ligações entre elementos com uma exposição ao fogo característica, e para resistências ao fogo não excedendo os 60 minutos. As regras aplicam-se a ligações com pregos, parafusos de porca e de enroscar, cavilhas, placas denteadas e anéis e placas metálicas. Essas mesmas regras aplicam-se a ligações de três elementos simétricas, com forças actuantes de corte (Figura 4.5). Aqui só são consideradas as ligações com elementos laterais de madeira. A análise ao fogo para ligações com chapa metálica lateral terá de ser feita de acordo com as regras presentes no Eurocódigo 3, para estruturas metálicas.

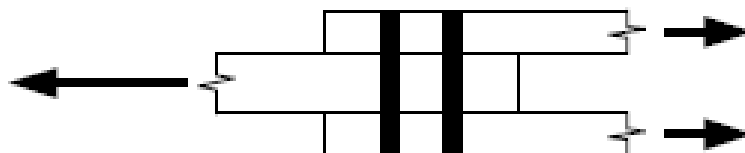


Figura 4.5 – Ligação simétrica em duplo corte

4.3 Método Simplificado

4.3.1 Ligações desprotegidas

A resistência ao fogo para ligações madeira-madeira desprotegidas, onde os espaçamentos e distâncias e as dimensões dos membros laterais de madeira cumprem com os requerimentos do Eurocódigo 5, parte 1-1, são os apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Resistência ao fogo de ligações desprotegidas com elementos laterais de madeira

	Tempo resistente ao fogo $t_{d,fi}$ (min)	Condições*
Pregos	15	$d \geq 2.8\text{mm}$
Parafusos de rosca	15	$d \geq 3.5\text{mm}$
Parafusos de porca	15	$t_1 \geq 45\text{mm}$
cavilha	20	$t_1 \geq 45\text{mm}$
Conectores (anéis, chapas e placas denteadas)	15	$t_1 \geq 45\text{mm}$
*d é o diâmetro do ligador e t_1 é a espessura do elemento lateral		

Para períodos de resistência $t_{d,fi}$ maiores às enumeradas na Tabela 4-3, mas não excedendo os 30 minutos, excepto para parafusos de porca, deve ser aumentado por uma distância a_{fi} as seguintes dimensões (Figura 4.6):

- A espessura dos elementos laterais;
- A largura dos elementos laterais;
- Os espaçamentos e distâncias ao topo e bordo dos ligadores;

$$a_{fi} = \beta_n K_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}) \quad (23)$$

Onde,

β_n : é a taxa de carbonização, de acordo com a Tabela 4-2;

K_{flux} : é o coeficiente que tem em linha de conta o fluxo de calor pelo ligador (o valor a usar deve ser $K_{flux}=1,5$);

t_{req} : é o tempo requerido para a resistência ao fogo;

$t_{d,fi}$: é o período de resistência ao fogo para a ligação desprotegida, dado na Tabela 4-3;

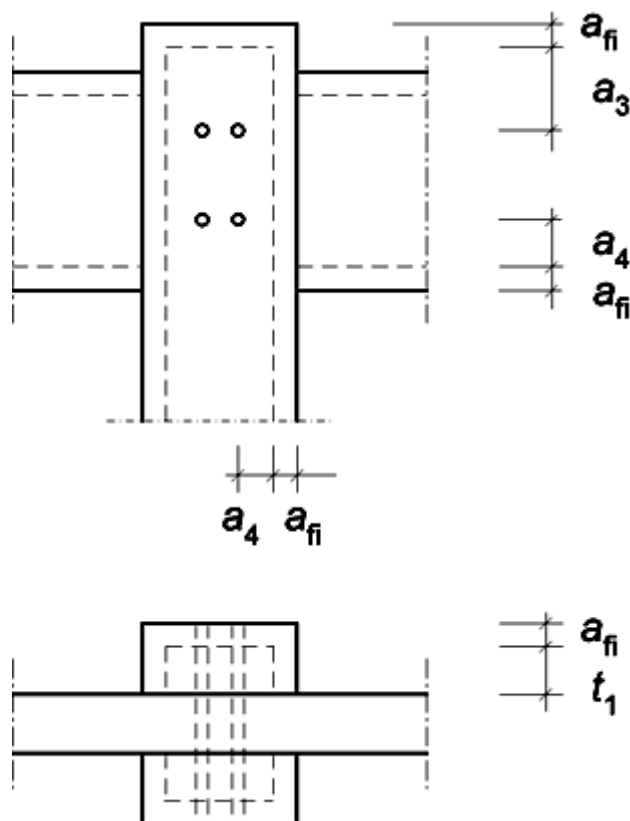


Figura 4.6 – Distância adicional a_{fi} (EN1995-1-2 2004)

No caso dos conectores esse aumento de espessura, a_{fi} , também não deve ser considerado, já que se aplica o mesmo que o caso dos parafusos de porca. Isso deve-se ao facto dos conectores estarem no interior das ligações e portanto não expostos ao fogo, o que implica que apenas os parafusos de porca que fixam os conectores são considerados para o dimensionamento ao fogo.

4.3.2 Ligações protegidas

De modo a aumentar a resistência ao fogo das ligações até 60 minutos, a ligação deve ser protegida com recurso a placas de madeira colocadas lateralmente. Estas podem ser de derivados de madeira ou de gesso cartonado. Este último possui uma elevada resistência ao fogo. As placas de protecção devem ter uma espessura mínima de a_{fi} e a distância dos ligadores ao lado dos elementos deve ser pelo menos igual a a_{fi} (Figura 4.7).

- Quando a ligação é protegida pela adição de painéis de derivados de madeira ou por placas de gesso cartonado tipo A ou H, o seu tempo de carbonização tem de verificar:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{d,fi} \quad (24)$$

- Quando a ligação é protegida pela adição de placas de gesso cartonado tipo F, o seu tempo de carbonização tem de verificar:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2t_{d,fi} \quad (25)$$

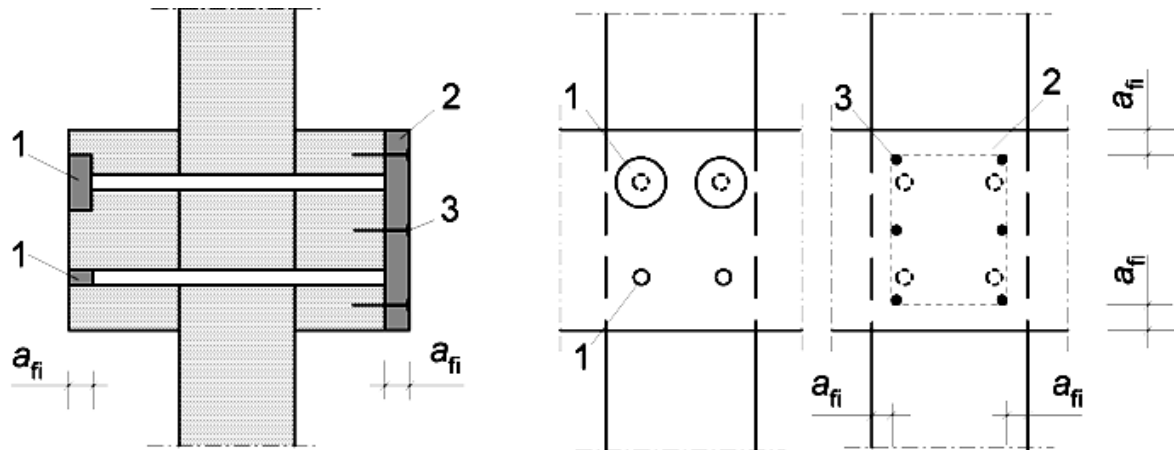


Figura 4.7 – Exemplos de elementos de protecção adicional (EN1995-1-2 2004)

Legenda:

1-Tampões

2-Protecção adicional usando painéis

3-Fixadores dos painéis

Nas ligações aparafusadas as cabeças dos parafusos devem ser protegidas por uma protecção de espessura a_{fi} (Figura 4.8).

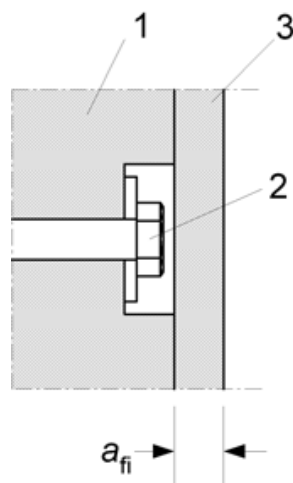


Figura 4.8 – Exemplo de protecção da cabeça de um parafuso de porca (EN1995-1-2 2004)

Legenda:

- 1-elemento de madeira
- 2-cabeça do parafuso
- 3-elemento de protecção

Para protecções ao fogo constituídas por uma ou mais camadas de painéis de madeira ou derivados de madeira, o tempo de início de carbonização t_{ch} , desse elemento de protecção é dado por:

$$t_{ch} = \frac{h_p}{\beta_0} \quad (26)$$

Onde,

h_p : é a espessura do painel (em caso de várias camadas, é a espessura total);

Para protecções ao fogo constituídas por uma placa de gesso cartonado do Tipo A, F ou H de acordo com a EN 520, para localizações internas ou no perímetro adjacente como protecção das ligações, ou para preencher folgas com uma espessura menor ou igual a 2mm, o tempo de início de carbonização t_{ch} é dado por:

$$t_{ch} = 2,8h_p - 14 \quad (27)$$

Onde,

h_p : é a espessura do painel, em mm;

Em localizações adjacentes às ligações para preencher folgas com uma espessura maior que 2mm, o tempo de início de carbonização t_{ch} é dado por:

$$t_{ch} = 2,8h_p - 23 \quad (28)$$

Para ligações com chapas internas metálicas de espessura igual ou maior que 2mm, e que não se projectam para além da superfície da madeira, a largura b_{st} das chapas metálicas devem observar as condições expressas na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Larguras das placas metálicas com bordos desprotegidos

		b_{st}
Bordo sem protecção em geral	R30	$\geq 200\text{mm}$
	R60	$\geq 280\text{mm}$
Bordo sem protecção em um ou dois lados	R30	$\geq 120\text{mm}$
	R60	$\geq 280\text{mm}$

No caso de chapas metálicas mais curtas que os elementos de madeira (Figura 4.9), estas devem ser consideradas como protegidas quando se verifica os seguintes casos:

- Para chapas de espessura inferior a 3 mm, onde a saliência d_g , é maior que 20 mm para uma período de resistência ao fogo de 30 minutos, e maior que 60 mm para um período de resistência ao fogo de 60 minutos.
- Para ligações com faixas coladas ou painéis de derivados de madeira, onde a espessura das faixas, d_g , ou do painel, h_p , é maior que 10 mm, para períodos de resistência ao fogo de 30 minutos e maiores que 30 mm, para períodos de resistência ao fogo de 60 minutos.

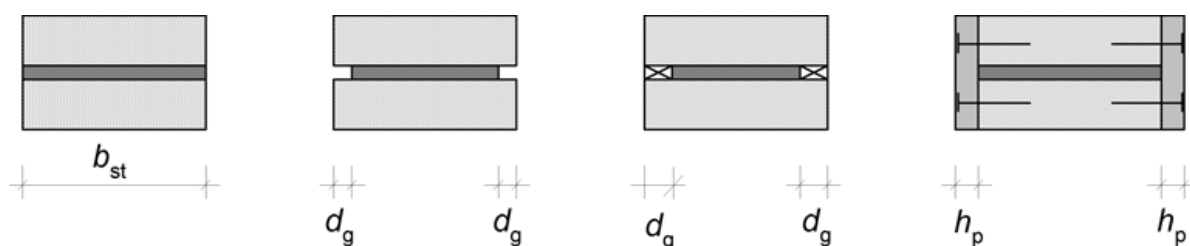


Figura 4.9 – Protecção dos bordos da ligação (EN1995-1-2 2004)

4.4 Método da redução da carga

4.4.1 Ligações desprotegidas

Uma estratégia alternativa para aumentar a resistência ao fogo de uma ligação é reduzindo a carga, ou reduzir a carga juntamente com o aumento do tamanho dos elementos, ou por aplicação de protecção. O gráfico que relaciona a relativa capacidade de carga com o tempo é uma função exponencial (Figura 4.10), e apresenta uma boa aproximação em relação aos resultados experimentais (Konig and Winter 2004). O parâmetro k , descreve essa função exponencial para os diferentes tipos de ligação, e foi determinado com base nos resultados de alguns estudos, envolvendo a análise de alguns ligadores em situação de incêndio (Moss, Buchanan et al. 2009),(Andrea Frangi 2009),(Konig and M. 2001). Essa relação é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = e^{-kt_{d,fi}} \quad (29)$$

Com,

k : parâmetro dado pela tabela 4-5;

$t_{d,fi}$: é a resistência ao fogo de cálculo da ligação desprotegida, em minutos;

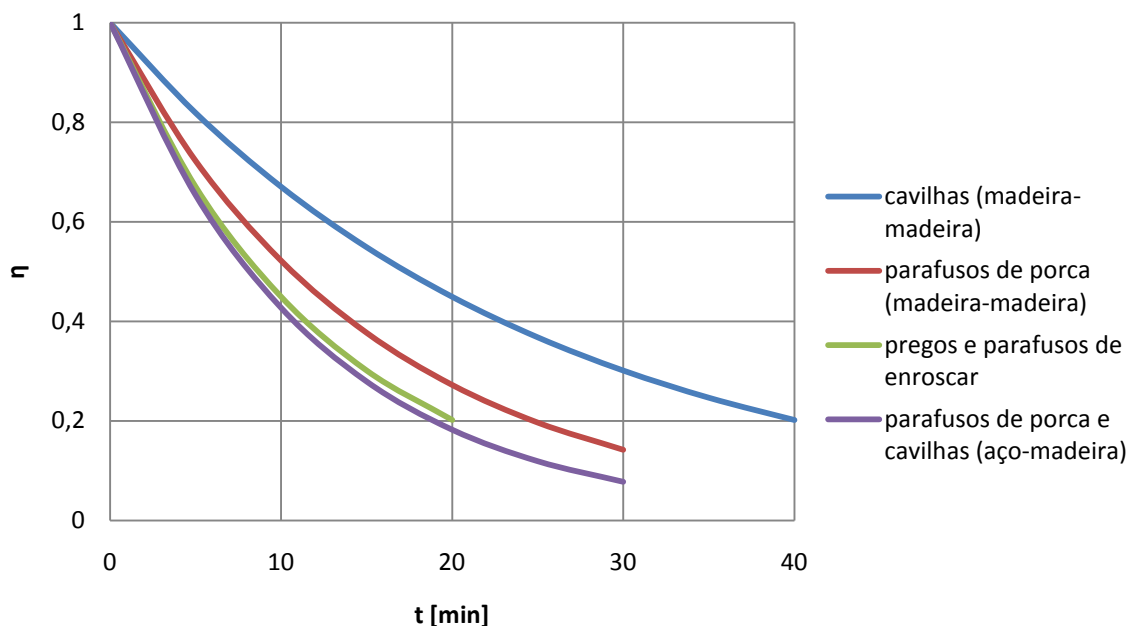


Figura 4.10 – Gráfico da relação de carga e o tempo de resistência, para pregos, parafusos e cavilhas

De acordo com este método, para uma exposição a um fogo característico, a capacidade de carga característica de uma ligação com ligadores sujeitos ao corte é calculada por:

$$F_{v,Rk,fi} = \eta F_{v,Rk} \quad (30)$$

Com,

η : Dado pela expressão (29);

$F_{v,Rk}$: Capacidade de carga lateral característica de um conector com ligadores ao corte à temperatura normal;

A resistência ao fogo de cálculo de uma ligação desprotegida, carregada com o valor de cálculo do efeito das acções para a situação de incêndio, deve ser calculada por:

$$t_{d,fi} = -\frac{1}{k} \ln \frac{\eta_{fi} \gamma_{M,fi}}{\gamma_M K_{fi}} \quad (31)$$

O valor do parâmetro k é dado pela Tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Parâmetro k

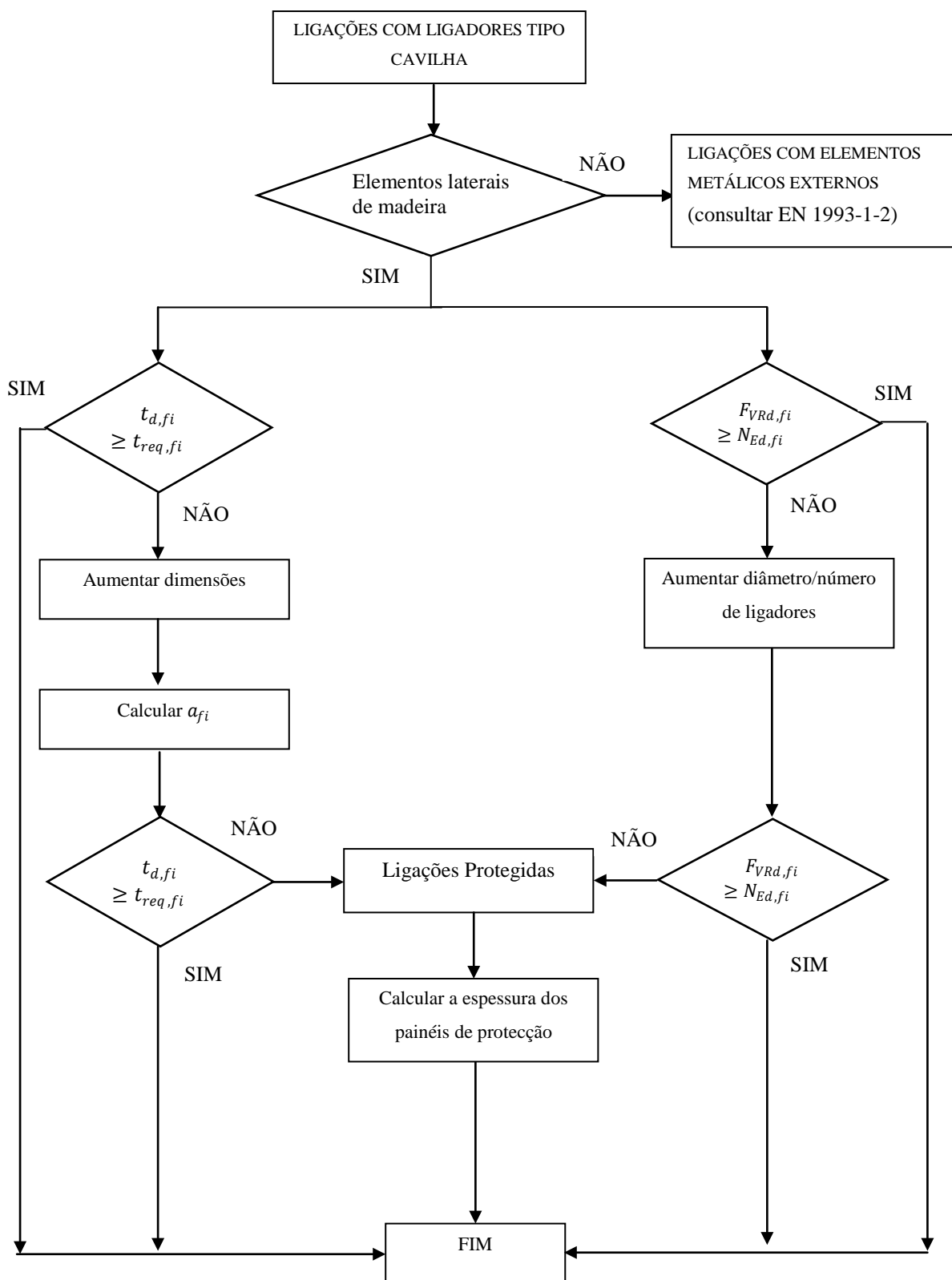
Ligação com:	k	Máximo período de validação do parâmetro k (ligação desprotegida) (min)
Pregos e parafusos de enroscar	0,080	20
Parafusos de porca em madeira-madeira, $d \geq 12\text{mm}$	0,065	30
Parafusos de porca em aço-madeira, $d \geq 12\text{mm}$	0,085	30
Cavilhas em madeira-madeira, $d \geq 12\text{mm}$	0,04	40
Cavilhas em aço-madeira, $d \geq 12\text{mm}$	0,085	30
Conectores	0,065	30

Para ligações com pregos ou parafusos de enroscar, com cabeças não projectadas, para resistências maiores que as dadas pela expressão (31), mas não mais que 30 minutos, a espessura do elemento lateral e as distâncias ao topo e bordo devem ser aumentados usando a expressão (23).

4.4.2 Ligações protegidas

Aplica-se o mesmo que o apresentado para o método simplificado (ver 4.3.2 – Ligações protegidas).

4.5 Diagrama de dimensionamento ao fogo para ligações



5 ESTUDOS SOBRE AS LIGAÇÕES

5.1 Aspectos gerais

Neste capítulo pretende-se fazer uma análise pormenorizada a diversos parâmetros, referidos ao longo dos capítulos anteriores, fazendo para tal um estudo, incluindo várias configurações de ligações, com diferentes ligadores, dimensionadas para temperatura ambiente e ao fogo, de acordo com os modelos de cálculo presentes no Eurocódigo 5.

De modo a atingir esse objectivo faz-se variar diversos aspectos da natureza da ligação e dos ligadores, de modo a obter várias configurações diferentes, por forma a avaliar a influência de cada parâmetro no dimensionamento da ligação.

Os elementos de madeira considerados nestes estudos são de madeira lamelada colada, a razão dessa escolha prende-se com o facto de ser um tipo de madeira inovadora, com um grande incremento de utilização nos projectos de estruturas de madeira. A madeira é da classe GL28h, de densidade, $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$.

Nesta análise são estudados três tipos de ligação simétricas, todas ligações com três elementos, em duplo corte, tal como é requerido no Eurocódigo 5 na secção do cálculo da resistência ao fogo das ligações, que são:

- a) Ligação aço-madeira, com chapa metálica lateral (A-M-A);
- b) Ligação aço-madeira, com chapa metálica central (M-A-M);
- c) Ligação madeira-madeira (M-M-M);

Cada um desses três tipos de ligações está sujeito a três diferentes cargas. Cada um desses esforços actuantes qualitativamente representa, uma carga elevada, uma carga média-elevada e uma carga média-baixa (os valores apresentados são valores de cálculo):

Carga 1: 300 kN

Carga 2: 100 kN

Carga 3: 30 kN

5.1.1 Características dos ligadores

Para cada ligação são usados diferentes tipos de ligadores, em duas gamas de diâmetros. Como ligadores de tipo cavilha serão usados, pregos, parafusos de porca e cavilhas, e como conectores, placas denteadas, anéis metálicos (“Split-Ring”) e placas metálicas (“Shear Plate”). Não são considerados os parafusos de enroscar, pelo motivo de que para efeitos de cálculo, tanto podem ser considerados como pregos ou parafusos de porca, consoante o seu diâmetro. Com base nisso, a escolha feita foi usar um diâmetro um pouco acima nos pregos, e de certo modo cobrir os parafusos de enroscar.

Na Tabela 5-1 apresentam-se as características dos ligadores considerados e que são usados no dimensionamento à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Tabela 5-1 – características dos ligadores

Ligador	Características
Pregos	-Pregos 3,7/80 ($\Phi 3,7\text{mm}$; $L=80\text{mm}$) -Pregos 5,0/100 ($\Phi 5,0\text{mm}$; $L=100\text{mm}$)
Parafusos de porca	- M12 ($\Phi 12\text{mm}$; $A_s=84,3\text{mm}^2$) Classe resistência 6-8 - M20 ($\Phi 20\text{mm}$; $A_s=245\text{mm}^2$) Classe resistência 6-8
Cavilhas	- $\Phi 8$ ($A_s=38,6\text{mm}^2$) - $\Phi 12$ ($A_s=84,3\text{mm}^2$)
Placas denteadas	- Modelo BD62, tipo C2 ($\Phi 62\text{mm}$; parafuso $\Phi 16$; $h_e=7,5\text{mm}$) - Modelo BD95, Tipo C2 ($\Phi 95\text{mm}$; parafuso $\Phi 20$; $h_e=11,35\text{mm}$)
Anéis metálicos	Modelo tipo A1, $d_c=80$ ($\Phi 80\text{mm}$; parafuso $\Phi 12$; $h_e=15\text{mm}$) Modelo tipo A1, $d_c=126$ ($\Phi 126$; parafuso $\Phi 12$; $h_e=15\text{mm}$)
Placas metálicas	Modelo tipo B1, $d_c=80\text{mm}$ ($\Phi 80\text{mm}$; parafuso $\Phi 12$; $h_e=7,5\text{mm}$) Modelo tipo B1, $d_c=115\text{mm}$ ($\Phi 115\text{mm}$; parafuso $\Phi 12$; $h_e=7,5\text{mm}$)

5.1.2 Características dos elementos de madeira

Conforme a geometria da ligação, para cada esforço actuante obtém-se uma determinada secção de madeira. Para as secções consideradas neste capítulo têm de ser verificada a tensão paralela às fibras, induzida pelo esforço de tracção nas peças devido à aplicação das cargas axiais referidas atrás. Essa verificação traduz-se na seguinte expressão, onde a tensão actuante, σ_{td} , tem de ser inferior à tensão resistente, $f_{t,0,d}$:

$$\sigma_{td} = \frac{Fd}{A_s} < f_{t,0,d} \quad (32)$$

Onde,

Fd : Cargas axiais aplicadas aos elementos de madeira (a) 300kN, b) 100kN, c) 30kN);

A_s : Área da secção transversal do elemento de madeira;

$f_{t,0,d}$: Valor de cálculo da tensão resistente paralela às fibras, calculado em função da tensão paralela às fibras característica da madeira, f_k , que para o tipo de madeira adoptada (Gl 28h) vale, $f_k=19,5 \text{ N/mm}^2$;

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} f_k}{\gamma_M} \quad (33)$$

Para os valores de k_{mod} , coeficiente modificação, é usado o valor de 0,8, referente a acções de média duração, e para γ_M , factor de segurança parcial, o valor de 1,25, que é o indicado para madeira lamelada colada.

Na Tabela 5-2, apresentam-se as dimensões das secções transversais dos elementos de madeira considerados para as diversas análises desenvolvidas neste capítulo.

Tabela 5-2 - Dimensões das secções transversais dos elementos de madeira

Ligação	Dimensões (altura x largura), em mm		
	Fd=300kN	Fd=100kN	Fd=30kN
a) aço-madeira (com a chapa metálica lateral)	Central: (300x100)	Central: (200x100)	Central: (100x50)
b) aço-madeira (com a chapa metálica central)	Lateral: (300x96)	Lateral: (200x96)	Lateral: (100x50)
c) madeira-madeira	Central: (300x100)	Central: (200x100)	Central: (100x50)
	Lateral: (300x50)	Lateral: (200x50)	Lateral: (100x36)

Quanto à chapa metálica usada nas ligações aço-madeira, terá uma espessura de 8mm, e terá as duas configurações descritas em cima, nas duas ligações diferentes aço-madeira.

Para melhor elucidar a visualização das ligações propostas em cima, com as diferentes secções de madeira, e já que isto é um estudo meramente teórico e portanto as estruturas não são reais, nem sujeitas a ensaios laboratoriais, é apresentado as seguintes esquematizações das diferentes ligações aqui dimensionadas.



Figura 5.1 – Ligação aço-madeira com chapa metálica lateral

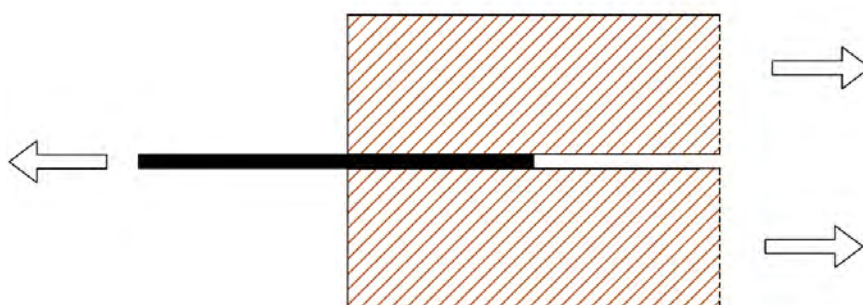


Figura 5.2 – Ligação aço-madeira com chapa metálica central

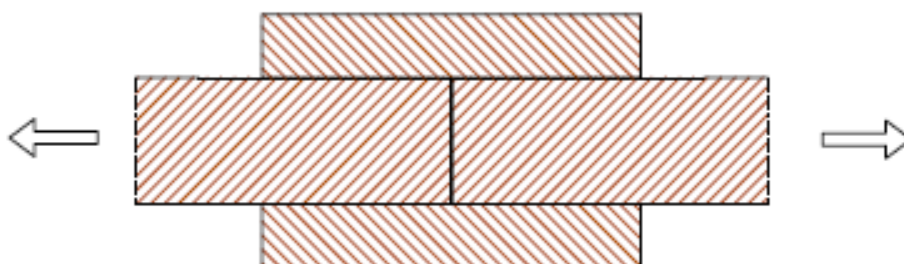


Figura 5.3 – Ligação madeira-madeira

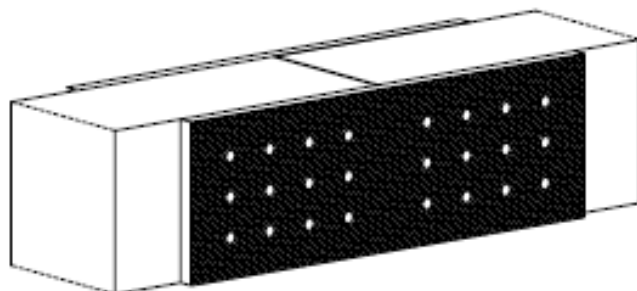


Figura 5.4 – Ligação aço-madeira, com chapa metálica lateral (em 3D)

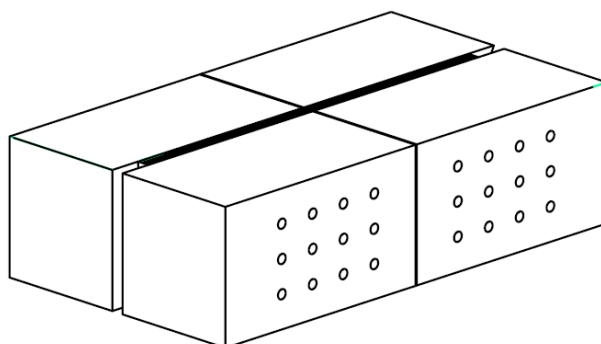


Figura 5.5 – Ligação aço-madeira, com chapa metálica central (em 3D)

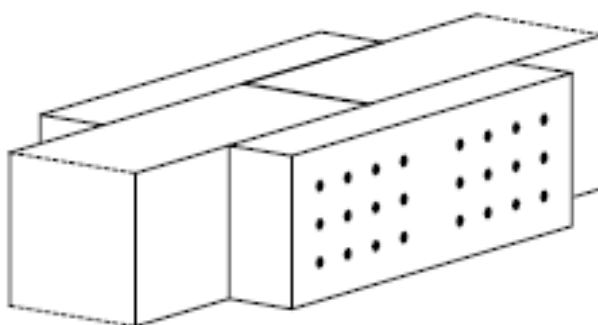


Figura 5.6 – Ligação madeira-madeira (em 3D)

5.2 Dimensionamento das ligações à temperatura ambiente

Para cada geometria e esforço actuante, é dimensionado a respectiva ligação, usando os diversos tipos de ligador e seus diâmetros. O dimensionamento é feito com base no Eurocódigo 5 parte 1-1, no cálculo da capacidade de carga característica $F_{v,Rk}$, em função da geometria da ligação e do tipo de ligador, conforme os pontos aqui apresentados no Capítulo 3.

Com este dimensionamento a temperatura ambiente pretende-se, além do necessário cálculo da resistência da ligação a frio, para posteriormente ser dimensionada em situação de incêndio, a análise das variáveis aqui em questão, nomeadamente o tipo de ligador, o seu diâmetro, o tipo de ligação, e o esforço actuante. Assim é espectável que a variação desses parâmetros referidos, produza diferentes resultados, ou seja diferentes capacidades de carga e consequentemente diferentes configurações de números de ligadores a usar.

A escolha dos ligadores a usar numa ligação é um factor determinante na economia e na qualidade de um projecto de estruturas de madeira. O ligador vai afectar a capacidade resistente da ligação e também as suas dimensões, portanto pretende-se com esta análise saber para cada geometria e esforço actuante, que ligadores se adequam melhor, ou seja para um determinado esforço e uma determinada geometria existem ligadores que criam ligações, que por diversos factores, tanto económicos, como estéticos, como de facilidade de execução, ou mesmo de qualidade, são os mais indicados.

Os resultados apresentados de seguida foram obtidos com o auxílio de uma folha de cálculo, programada com o método de cálculo do EC5 para ligadores metálicos em um ou duplo corte, ligação madeira-madeira e ligação aço-madeira. São apresentados em forma de tabela e organizados por ligadores, pregos, parafusos e cavilhas e conectores. Em cada um deles é referido as principais particularidades de cálculo e é enunciado um resumo da metodologia de cálculo que foi efectuado. No anexo A é possível consultar as tabelas mais detalhadas do dimensionamento das ligações. O dimensionamento é feito para as três geometrias objecto de estudo:

- Ligação aço-madeira, com chapa metálica lateral (A-M-A);
- Ligação aço-madeira, com chapa metálica central (M-A-M);
- Ligação madeira-madeira (M-M-M);

A capacidade resistente característica de cada ligador, $F_{v,Rk}$, é calculada através das equações de Johansen, em função das dimensões t_1 e t_2 , do momento de cedência plástico do ligador ($M_{y,Rk}$) e pela tensão de esmagamento na madeira ($f_{h,k}$), para ligações aço-madeira e madeira-madeira, conforme apresentado no capítulo 3. A capacidade de carga de cálculo, $F_{v,Rd}$, é dada por:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} \times K_{mod}}{\gamma_M} \quad (34)$$

5.2.1 Pregos

Considerando os diâmetros (d) e o comprimento dos pregos (l) estudados:

- Propriedades Geométricas:

Diâmetro da cabeça do prego: $d_h = 2,25d$

Penetração de ponta do prego: $t_{point} = l - t_1$

Máximo penetração de ponta: $t_2 - t_{point} > 4d$

- Propriedades da madeira e dos pregos:

Tensão característica de tracção paralela às fibras (madeira Gl28h): $f_{t,0,k} = 19,5 N/mm^2$

Densidade característica da madeira: $\rho_k = 410 Kg/m^3$

Tensão de cedência de cada prego: $f_u = 600 N/mm^2$

- Resistência ao esmagamento:

Até diâmetros de 8mm, em madeira ou LVL e sem pré-furação (Consultar Tabela 3-2).

- Momento de cedência:

Consultar a Tabela 3-1.

- Resistência ao arranque (axial):

Consultar a Tabela 3-4.

- Capacidade de carga resistente característica:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad \beta = 1 \text{ e } t_2 = t_{point}$$

Ligação em corte simples, com t_1 e t_2 , definidas na Figura 5.7:

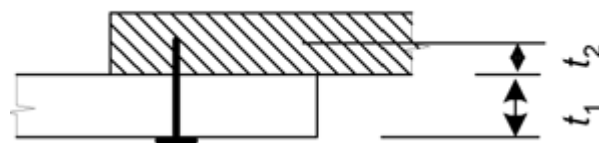


Figura 5.7 – Dimensões em ligação pregada (EN1995-1-1 2004)

A ligação pregada é de corte simples, consoante seja ligação madeira-madeira, ou aço-madeira o seu valor, $F_{v,Rk}$, é calculado adoptando a equação de Johansen (Capítulo 3) que se adapta ao caso a calcular.

- Número de pregos requerido:

$$N_{pregos} = \frac{F_d}{F_{v,Rd} \cdot 2} \quad (35)$$

-Espaçamentos:

Consultar a Tabela 3-6.

O número efectivo de ligadores é igual ao número de ligadores, considerando sempre $k_{ef} = 1$ (Consultar Tabela 3-7).

Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5-3, correspondente à capacidade de carga, $F_{v,Rk}$, e o número de ligadores para cada esforço actuante e nas três diferentes geometrias de ligação.

Tabela 5-3 – Dimensionamento das ligações usando pregos

Carga (F_d)	Diâmetro (mm)	Ligação A-M-A		Ligação M-A-M		Ligação M-M-M	
		$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores
300kN	Φ3,7	672	446	-	-	1251	390
	Φ5,0	830	362	-	-	2011	240
100kN	Φ3,7	672	242	-	-	1251	130
	Φ5,0	830	200	-	-	2011	60
30kN	Φ3,7	672	80	-	-	999	100
	Φ5,0	830	60	-	-	1842	32

5.2.2 Parafusos e cavilhas

Considerando os diâmetros (d) e as áreas (A_s) dos parafusos e cavilhas estudados:

- Propriedades da madeira e dos parafusos

Tensão característica perpendicular às fibras: $f_{c,90,k} = 0,45 N/mm^2$

Densidade característica da madeira: $\rho_k = 410 Kg/m^3$

Tensão de cedência característica: $f_{u,k} = 400 N/mm^2$

- Resistência ao esmagamento:

Para parafusos até 30mm de diâmetro, e num ângulo de 90° com as fibras (Consultar Tabela 3-3).

- Momento de cedência:

Consultar Tabela 3-1.

- Resistência ao arranque (axial):

Só se aplica para o caso dos parafusos, as cavilhas não tem resistência axial e portanto

$F_{ax}(cavilhas) = 0$.

(Consultar Tabela 3-4)

- Capacidade de carga resistente característica:

Ligação em duplo corte, com t_1 sendo a espessura do elemento lateral de madeira e t_2 a espessura do elemento central de madeira. O valor da capacidade de carga resistente, $F_{v,Rk}$, é calculado adoptando a equação de Johansen (Capítulo 3) que se adapta ao caso a calcular.

- Número de parafusos/cavilhas requerido:

$$N_{parafusos} = \frac{F_d}{F_{V,Rd}} \quad (36)$$

- Disposições construtivas:

É tido em conta o número efectivo de ligadores de acordo com a Tabela 3-7.

Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5-4, correspondente à capacidade de carga, $F_{v,Rk}$, e o número de ligadores para cada esforço actuante e em nas três diferentes geometrias de ligação.

Tabela 5-4 – Dimensionamento das ligações usando parafusos de porca e cavilhas

Carga (F_d)	Diâmetro (mm)	Ligação A-M-A		Ligação M-A-M		Ligação M-M-M	
		$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores
Parafusos							
300kN	Φ12	12830	60	13850	50	8640	80
	Φ20	18179	42	26000	42	18179	42
100kN	Φ12	12830	24	13850	18	8640	30
	Φ20	18179	20	26000	12	18179	20
30kN	Φ12	6415	22	10312	16	6415	22
	Φ20	9089	20	18179	8	9089	20
Cavilhas							
300kN	Φ8	4434	160	6720	96	4036	140
	Φ12	8839	84	11858	60	6648	100
100kN	Φ8	4434	60	6720	40	4036	60
	Φ12	8839	32	11858	24	6648	40
30kN	Φ8	4434	30	4926	30	3386	24
	Φ12	6414	18	8321	18	6000	12

5.2.3 Conectores

- Geometria dos conectores:

d_c : diâmetro do conector

t : espessura da parte central metálica (no caso das placas denteadas)

h_c : Altura do conector

- Espessura de penetração do elemento:

No caso das placas denteadas: $h_e = \frac{h_c - t}{2}$

No caso dos anéis e placas metálicas: $h_e = \frac{h_c}{2}$

- Capacidade de carga resistente característica:

Ligação em duplo corte, com t_1 representando a espessura do elemento lateral de madeira e t_2 a espessura do elemento central de madeira;

Os anéis metálicos são usados em ligações madeira-madeira e as placas metálicas em ligações aço-madeira.

O cálculo da capacidade de carga resistente é feito através das expressões (8) e (9).

No caso das placas denteadas: $F_{v,Rk}(ligação) = F_{v,Rk}(conector) + F_{v,Rk}(parafuso)$

No caso dos anéis e placas metálicas: $F_{v,Rk}(ligação) = F_{v,Rk}(conector)$

Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 5-5, correspondente à capacidade de carga, $F_{v,Rk}$, e o número de ligadores para cada esforço actuante e em nas três diferentes geometrias de ligação.

Tabela 5-5 – Dimensionamento das ligações usando placas denteadas e anéis e placas metálicas

Carga (F_d)	Diâmetro (mm)	Ligação A-M-A		Ligação M-A-M		Ligação M-M-M	
		$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores	$F_{v,Rk}$ (N)	Nº Ligadores
Placas denteadas							
300kN	Φ62	19442	30	21692	24	26214	24
	Φ95	22686	30	28704	18	38516	18
100kN	Φ62	19442	12	21692	8	26214	12
	Φ95	22686	8	28704	6	38516	6
30kN	Φ62	11550	4	17978	4	20804	4
	Φ95	13596	4	20883	4	23591	4
Placas metálicas							
300kN	Φ80	7872	66	4723	90	-	-
	Φ115	11316	48	6790	72	-	-
100kN	Φ80	7872	20	4723	32	-	-
	Φ115	11316	16	6790	24	-	-
30kN	Φ80	7872	8	4723	16	-	-
	Φ115	11316	8	6790	8	-	-
Anéis metálicos							
300kN	Φ80	-	-	-	-	22003	24
	Φ126	-	-	-	-	43491	12
100kN	Φ80	-	-	-	-	22003	8
	Φ126	-	-	-	-	43491	4
30kN	Φ80	-	-	-	-	14669	4
	Φ126	-	-	-	-	28994	2

5.3 Dimensionamento das ligações em situação de incêndio

Após o dimensionamento das ligações para temperatura ambiente, é agora avaliada a sua resistência ao fogo, aplicando o procedimento de cálculo descrito no Eurocódigo 5, parte 1-2 e aqui descrito no capítulo 4. No caso das ligações consiste na aplicação de dois métodos diferentes, o método simplificado e o método de redução da carga.

Um dos objectivos desta dissertação é a análise e a comparação desses dois métodos, e para tal, vão ser aplicados às ligações dimensionadas no ponto anterior, os dois métodos acima referidos.

Os cálculos serão efectuados para um tempo de exposição ao fogo de 30 minutos, que consiste no máximo tempo de resistência ao fogo, de acordo com o Eurocódigo 5, capaz de ser atingido em ligações sem protecção. Depois será calculado a protecção a aplicar às ligações, para um tempo de resistência ao fogo de 30 minutos e de 60 minutos, o máximo permitido pelo Eurocódigo 5. Dos três tipos de ligação inicialmente definidos para estes estudos, aqui neste capítulo só podem ser estudadas apenas as ligações com elementos laterais de madeira, ou seja, a ligação madeira-madeira e a ligação aço-madeira com chapa metálica central, portanto não será abordada a ligação aço-madeira com chapa metálica lateral, sendo esta objecto de estudo do Eurocódigo 3 para estruturas metálicas.

A análise será organizada pela separação entre método 1, correspondente ao método simplificado e o método 2, correspondente ao método de redução da carga. Dentro do método 2, será ainda dividida em duas análises distintas, uma a verificação usando o próprio método e outra calculando o tempo de resistência ao fogo da ligação.

5.3.1 Verificação ao fogo dos elementos de madeira

No entanto, antes da aplicação dos dois referidos métodos para a verificação da resistência ao fogo, das ligações dimensionadas anteriormente a frio, é necessário fazer a verificação ao fogo dos elementos de madeira e caso estes não resistam para a temperatura requerida de 30 minutos, é necessário considerar novas secções.

Acções: Calculadas pela equação (19);

Resistência Mecânica: Calculada pela equação (12);

Com: $f_{20} = K_{fi} f_k$

Madeira lamelada colada (Gl28h): $f_{t,o,g,k} = 19,5 \text{ Mpa}$

O valor do factor de redução da carga para a situação de incêndio, η_{fi} , como simplificação, é usado o valor recomendado pelo EC5 de 0,6.

Assim a tensão axial actuante, provocada pela acção E_d , tem de ser inferior à tensão resistente $f_{d,fi}$:

$$\frac{E_{d,fi}}{A_s} < f_{d,fi} \quad (37)$$

Na Tabela 5-6, é descrita a verificação ao fogo dos elementos de madeira para 30 minutos, que é a máxima temperatura que estes elementos têm de resistir sem protecção. Como era de esperar apenas as secções de menor dimensão, correspondentes à carga de 30kN, não verificam essa resistência ao fogo. As novas secções consideradas para estes casos, serão as mesmas secções correspondentes à carga de 100kN, por simplificação.

Tabela 5-6 – Verificação ao fogo dos elementos de madeira

Carga (kN)		Dimensões iniciais (mm)	Verificação ao fogo (30 min)	Novas dimensões (mm)
Ed	Ed,fi			
300	180	2x(96x300)	OK	-
100	60	2x(96x200)	OK	-
30	18	2x(50x100)	KO	2x(96x200)
300	180	(100x200)+ 2x(50x300)	OK	-
100	60	(100x200)+ 2x(50x200)	OK	-
30	18	(50x100)+ 2x(36x100)	KO	(100x200)+ 2x(50x200)

5.3.2 Aplicação do MÉTODO 1

5.3.2.1 Ligações não protegidas

Pelo método simplificado, em ligações desprotegidas, este garante a sua resistência ao fogo por um período de tempo, $t_{d,fi}$, em função do ligador usado (consultar tabela 4.3). Este tempo de resistência não diferencia o tipo de ligação, apenas restringe a sua aplicação às ligações com elementos laterais de madeira.

De modo a atingir o tempo requerido de 30 minutos, de acordo com este método é necessário aumentar a espessura e a largura dos elementos laterais de madeira e das distâncias ao bordo e topo dos ligadores, por a_{fi} , de acordo com a expressão (23), usando $\beta_n=0,7$ e $k_{flux}=1,5$.

A aplicação deste incremento, a_{fi} , está limitado apenas para pregos e cavilhas com cabeças não projectadas, o que elimina os restantes ligadores de poderem obter um aumento da resistência ao fogo, através deste modo.

Dessas dimensões referidas atrás, incrementadas por a_{fi} , a espessura é a única que influencia a capacidade resistente da ligação ($F_{v,Rk}$), porque faz variar as dimensões t_1 e t_2 , parâmetros estes que entram nas fórmulas de cálculo (Tabela 5.7).

Com base nesse factor, pretende-se avaliar o grau de sobredimensionamento que vai trazer à ligação esse incremento dado à espessura dos elementos laterais, de modo a atingir a resistência ao fogo de 30 minutos proposta.

Tabela 5-7 – Incremento a_{fi}

Ligador	$t_{req}=30\text{min}$
Pregos: $t_{d,fi}=15\text{min}$	$a_{fi}=15,8\text{mm}$
Cavilhas: $t_{d,fi}=20\text{min}$	$a_{fi}=10,5\text{mm}$

Para uma resistência ao fogo de 30 minutos, os resultados obtidos para a ligação aço-madeira e madeira-madeira, para os ligadores possíveis, estão apresentados nas tabelas 5-8 e 5-9.

Legenda:

- As dimensões t_1 e t_2 , representam respectivamente, a espessura do elemento lateral e central dos elementos de madeira;

- $F_{v,Rk}(1)$: representa a capacidade de carga do ligador, obtida no dimensionamento a temperatura ambiente (ver ponto 5.2);

- $F_{v,Rk}(2)$: representa a capacidade de carga do ligador, considerando o aumento da espessura com a adição de a_{fi} , a temperatura ambiente;

$$\eta = \frac{F_{v,Rk}(2)}{F_{v,Rk}(1)}$$

- Para a ligação aço-madeira com chapa metálica central:

Tabela 5-8 – Aplicação de a_{fi} à ligação M-A-M

Diâmetro (mm)	Dimensões iniciais	$F_{v,Rk}(1)$	Tempo exposição	Novas dimensões	$F_{v,Rk}(2)$	η
Ligação com cavilhas						
$\Phi 8$	t1=96mm t2=8mm	6270N	30 min	t1=106,5mm t2=8mm	6270N	1,00
$\Phi 12$	t1=96mm t2=8mm	11858N	30 min	t1=106,5mm t2=8mm	12500N	1,05

- Para a ligação madeira-madeira

Tabela 5-9 – Aplicação de a_{fi} à ligação M-M-M

Diâmetro (mm)	Dimensões iniciais	$F_{v,Rk}$ (1)	Tempo exposição	Novas dimensões	$F_{v,Rk}$ (2)	η
Ligação pregada						
$\Phi 3,7$	t1=50mm t2=100mm	1251N	30 min	t1=65,8mm t2=100mm	1251N	1,00
$\Phi 5,0$	t1=50mm t2=100mm	2011N	30 min	t1=65,8mm t2=100mm	2011N	1,00
Ligação com cavilhas						
$\Phi 8$	t1=50mm t2=100mm	4036N	30 min	t1=60,5mm t2=100mm	4434N	1,10
$\Phi 12$	t1=50mm t2=100mm	6648N	30 min	t1=60,5mm t2=100mm	7275N	1,09

5.3.2.2 Ligações protegidas

De acordo com este método a única maneira de se atingir uma resistência ao fogo de 30 minutos é protegendo as ligações, (salvo o caso dos pregos e cavilhas, que é possível aumentar a espessura dos elementos de madeira). Com a protecção das ligações pode-se atingir no máximo 60 minutos de resistência ao fogo.

Após o cálculo do tempo de resistência ao fogo para as ligações desprotegidas, no ponto anterior, agora vai ser calculado as dimensões dos painéis de protecção a colocar sobre as ligações, de modo a estas obterem uma resistência ao fogo de 30 e 60 minutos. O Eurocódigo 5, parte 1-2, apresenta duas hipóteses de protecção, usando placas de madeira ou derivados de madeira, e com placas de gesso cartonado tipo A e F.

O cálculo da espessura das placas de protecção é descrito no ponto 4.3.2, e é baseado na limitação do tempo de carbonização, t_{ch} , dependente do tempo requerido, t_{req} , e do tempo de resistência ao fogo da ligação desprotegida, $t_{d,fi}$. Com esse tempo e em função da placa usada é possível determinar a espessura da placa de protecção, h_p .




De seguida apresenta-se em resumo na tabela 5-10, as fórmulas usadas para o dimensionamento das placas de protecção.

Tabela 5-10 – Fórmulas para o cálculo da espessura das placas de protecção

Tipo de placa de protecção	Tempo de carbonização (t_{ch}) (minutos)	Espessura da placa (h_p) (mm)
Painéis de madeira ou derivados de madeira	$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{d,fi}$	$h_p = t_{ch} \times \beta_o$ β_o : é a taxa de combustão (mm/min) e para madeira lamelada colada vale 0,65
Gesso cartonado tipo A ou H	$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{d,fi}$	$h_p = \frac{t_{ch} + 14}{2,8}$
Gesso cartonado tipo F	$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2t_{d,fi}$	

Como placas de protecção de gesso cartonado vão ser usadas dois tipos de placas, placa de gesso cartonado, modelo standard, Tipo A e uma placa de gesso cartonado corta-fogo, Tipo F. Como placa de protecção de derivados de madeira vai ser utilizado uma placa de contraplacado. Na Tabela 5-11 estão representados os modelos e as dimensões comerciais.

Tabela 5-11- Espessuras das placas de protecção

Placas:	Espessuras
Gesso cartonado, Tipo A, Knauf 	9,5mm 12,5mm 15mm 18mm
Gesso cartonado, Tipo F, Knauf 	12,5mm 15mm 18mm
Contraplacado A/C (Damadeira), dimensões standard 2500x1250 mm 	4mm 5mm 6mm 8mm 10mm 12mm 15mm 18mm 20mm 25mm 30mm

Os resultados são apresentados na Tabela 5-12, para tempos de resistência ao fogo de 30 minutos e 60 minutos, para cada tipo ligador usado na ligação. A aplicação consiste em ligações com elementos laterais de madeira, que é o caso da ligação aço-madeira com chapa metálica central e madeira-madeira. Pelo facto dos conectores estarem no interior dos elementos de madeira e apenas os parafusos de porca que os fixam, serem relevantes para esta análise, os conectores ficam assim englobados dentro do tipo de ligador, parafusos de porca.

Tabela 5-12 – Dimensionamento de placas de protecção

Ligador	$t_{d,fi}$ (min)	Tempo requerido (t_{req})	t_{ch} (min)	Dimensões	
				h_p (mm)	Nº placas
Gesso cartonado tipo A					
Pregos	15	30min	22,5	13,0	1x (15mm)
		60min	52,5	23,8	2x (12,5mm)
Cavilhas	20	30min	20,0	12,1	1x (12,5mm)
		60min	50,0	22,9	2x (12,5mm)
Parafusos de porca	15	30min	22,5	13,0	1x (15mm)
		60min	52,5	23,8	2x (12,5mm)
Gesso cartonado tipo F					
Pregos	15	30min	12,0	9,3	1x (12,5mm)
		60min	42,0	20,0	2x (12,5mm)
Cavilhas	20	30min	6,0	7,1	1x (12,5mm)
		60min	36,0	17,9	1x (18mm)
Parafusos de porca	15	30min	12,0	9,3	1x (12,5mm)
		60min	42,0	20,0	2x (12,5mm)
Contraplacado					
Pregos	15	30min	22,5	14,6	1x (15mm)
		60min	52,5	34,1	2x (18mm)
Cavilhas	20	30min	20,0	13,0	1x (15mm)
		60min	50,0	32,5	2x (18mm)
Parafusos de porca	15	30min	22,5	14,6	1x (15mm)
		60min	52,5	34,1	2x (18mm)

5.3.3 Aplicação do MÉTODO 2

Conforme enunciado no capítulo 4, este método consiste na redução da capacidade resistente da ligação, $F_{v,Rk}$, através do cálculo de um factor, η , que depende do tempo de resistência ao fogo pretendido, $t_{d,fi}$, e de um parâmetro k , uma constante dependente do ligador. Esse valor por sua vez é comparado com o esforço actuante reduzido para a situação de incêndio, $N_{Ed,fi}$, por aplicação do factor, η_{fi} , que neste caso vai assumir o valor de 0,6, valor recomendado no Eurocódigo 5, como simplificação, caso não se tenha um conhecimento da natureza das cargas e da sua relação.

Portanto a aplicação deste método consiste na verificação da seguinte condição:

$$F_{VRd,fi} \geq N_{Ed,fi} \quad (38)$$

A validade deste método é só até 30 minutos de tempo de resistência ao fogo e portanto a análise será feita apenas para esse valor. No caso de se pretenderem resistências ao fogo superiores, a solução é aplicar protecção nas ligações.

A análise que é feita usando este método, é a aplicação da verificação descrita acima para as diferentes combinações de ligações definidas para este estudo. Caso a ligação não verifique essa condição, é calculado o aumento de resistência que tinha de ter a ligação para que esta verificasse. Esse aumento de resistência teria de ser obtido através do aumento do número de ligadores, ou do diâmetro desses ligadores.

Além dessa análise descrita, e que é obtida impondo um tempo de resistência ao fogo de 30 minutos, é também calculado o tempo de resistência ao fogo, que tem as diferentes ligações estudadas. É uma abordagem diferente e pretende avaliar que resistência essas ligações têm, sem nenhum tipo de reforço.

Assim esta análise será dividida em duas diferentes abordagens:

- a) Verificação ao fogo das ligações para 30 minutos de exposição;
- b) Cálculo do tempo de resistência ao fogo das ligações;

a) Verificação ao Fogo das ligações para 30 minutos de exposição:

Esta verificação consiste em, impondo um tempo de exposição de 30 minutos, a que a ligação tem de resistir, verificar primeiro se esta apresenta essa resistência, e caso não verifique, determinar o incremento de capacidade de carga, ΔF_{vRk} , a fornecer à ligação para que esta passe assim a verificar a resistência ao fogo.

A apresentação dos valores obtidos será novamente em formato de tabela e seguindo a organização por geometria das ligações (ver Tabelas 5-13 e 5-14). De seguida apresenta-se uma legenda, de forma a elucidar melhor a aplicação deste método:

$N_{Ed,fi}$: Esforço actuante convertido para a acção de incêndio, usando o factor, η_{fi} , que toma o valor de 0,6;

F_{vRk} : Capacidade de carga característica da ligação, obtida pela multiplicação da capacidade unitária por ligador, pelo número total de ligadores na ligação;

k : Parâmetro correspondente a cada ligador (ver Capítulo 4);

η : Factor de conversão (ver Capítulo 4);

$F_{vRd,fi}$: Capacidade de carga de cálculo em situação de incêndio, dada pela expressão:

$$F_{vRd,fi} = \frac{\eta \times k_{mod,fi} \times F_{vRk}}{\gamma_{M,fi}} \quad (39)$$

Com:

$k_{mod,fi}$: factor de modificação para situação de incêndio e vale 1,15;

$\gamma_{M,fi}$: factor parcial de segurança em situação de incêndio e vale 1,0;

ΔF_{vRk} : Incremento de capacidade carga que a ligação tem de ter, de modo a verificar a resistência ao fogo para 30 minutos;

Este incremento de capacidade de carga teria de ser obtido com um aumento do número de ligadores ou do seu diâmetro, de modo a aumentar a capacidade de carga total da ligação e verificar este método para 30 minutos de resistência ao fogo.

- Ligação aço-madeira (M-A-M)

Tabela 5-13 – Verificação ao fogo para a ligação M-A-M

Diâmetro (mm)	N_{Ed} (kN)	$N_{Ed,fi}$ (kN)	F_{vRk} (kN)	k	η	$F_{vRd,fi}$ (kN)	$F_{VRd,fi}$ $\geq N_{Ed,fi}$	ΔF_{vRk} (kN)
Ligação Aparafusada								
Φ12	300	180	692,5	0,085	0,078	62,2	KO	1312
	100	60	249			22,4	KO	418,9
	30	18	165			14,8	KO	35,5
Φ20	300	180	1248			112	KO	756,6
	100	60	312			28	KO	356,2
	30	18	145,4			13	KO	55
Ligação com cavilhas								
Φ8	300	180	645,1	0,085	0,078	57,9	KO	1359,5
	100	60	268,8			24,1	KO	399,4
	30	18	147,8			13,3	KO	52,7
Φ12	300	180	711,5			63,9	KO	1293,1
	100	60	284,6			25,6	KO	383,6
	30	18	149,8			13,4	KO	50,7
Ligação com placas denteadas								
Φ62	300	180	520,6	0,065	0,142	85,2	KO	579,5
	100	60	173,5			28,4	KO	193,2
	30	18	71,9			11,8	KO	38,1
Φ95	300	180	516,7			84,5	KO	583,5
	100	60	172,2			28,2	KO	194,5
	30	18	83,5			13,7	KO	26,5
Ligação com placas metálicas								
Φ62	300	180	425	0,065	0,142	69,5	KO	675
	100	60	151,1			24,7	KO	215,6
	30	18	75,6			12,4	KO	34,4
Φ95	300	180	488,9			80	KO	611,3
	100	60	163			26,7	KO	203,8
	30	18	54,3			8,9	KO	55,7

- Ligação Madeira-Madeira (M-M-M)

Tabela 5-14 – Verificação ao fogo para a ligação M-M-M

Diâmetro (mm)	N_{Ed} (kN)	$N_{Ed,fi}$ (kN)	F_{vRk} (kN)	k	η	$F_{vRd,fi}$ (kN)	$F_{VRd,fi}$ $\geq N_{Ed,fi}$	ΔF_{vRk} (kN)
Ligação pregada								
$\Phi 3,7$	300	180	487,9	0,08	0,202	113,3	KO	287,4
	100	60	162,6			37,8	KO	95,8
	30	18	50			11,6	KO	27,6
$\Phi 5,0$	300	180	482,6			112,0	KO	292,6
	100	60	120,7			28,0	KO	137,8
	30	18	59,0			13,7	KO	18,6
Ligação aparafusada								
$\Phi 12$	300	180	691,2	0,065	0,142	113,1	KO	408,9
	100	60	259,2			42,4	KO	107,5
	30	18	102,6			16,8	KO	7,4
$\Phi 20$	300	180	763,5			124,9	KO	336,7
	100	60	327,2			53,5	KO	39,5
	30	18	181,8			29,7	OK	
Ligação com cavilhas								
$\Phi 8$	300	180	565	0,04	0,301	195,7	OK	
	100	60	242,2			83,9	OK	
	30	18	81,3			28,1	OK	
$\Phi 12$	300	180	664,8			230,3	OK	
	100	60	265,9			92,1	OK	
	30	18	72			24,9	OK	
Ligação com placas denteadas								
$\Phi 62$	300	180	629,1	0,065	0,142	102,9	KO	471
	100	60	314,6			51,5	KO	52,1
	30	18	83,2			13,6	KO	26,8
$\Phi 95$	300	180	693,3			113,4	KO	406,9
	100	60	231,1			37,8	KO	135,6
	30	18	94,4			15,4	KO	15,6
Ligação com anéis metálicas								
$\Phi 80$	300	180	528	0,065	0,142	86,4	KO	572
	100	60	176			28,8	KO	190,7
	30	18	58,6			9,6	KO	51,3
$\Phi 126$	300	180	521,9			85,4	KO	578,3
	100	60	173,9			28,5	KO	192,8
	30	18	58			9,5	KO	52

b) Cálculo do tempo de resistência ao fogo das ligações:

Após a verificação ao fogo aplicando o método 2 para os diversos tipos de ligação estudados, verificou-se que a maioria das ligações não resiste e portanto é necessário um reforço da capacidade de carga da ligação. Assim esta nova abordagem consiste em avaliar o tempo de resistência ao fogo que as ligações, sem qualquer tipo de reforço, conseguem resistir de acordo com o método 2.

Tal como na outra alínea, aqui os valores serão apresentados em forma de tabela e segundo o mesmo formato (ver Tabelas 5-15 e 5-16). De seguida apresenta-se uma legenda para elucidar melhor os cálculos efectuados e os seus resultados:

$N_{Ed,fi}$: Esforço actuante convertido para a acção de incêndio, usando o factor, η_{fi} , que toma o valor de 0,6;

F_{vRk} : Capacidade de carga característica da ligação, obtida pela multiplicação da capacidade unitária por ligador, pelo número total de ligadores da ligação;

k : Parâmetro correspondente a cada ligador (ver Capítulo 4);

η : Factor de conversão. Calculado igualando ($F_{vRd,fi} = N_{Ed,fi}$), condição para verificar a resistência ao fogo, deduzindo a seguinte expressão:

$$\eta = \frac{N_{Ed,fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{mod,fi} \times F_{vRk}} \quad (40)$$

η_{fi} : Factor redução para a carga de dimensionamento em situação de incêndio, calculado a partir da seguinte expressão deduzida:

$$\eta = \frac{\eta_{fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{mod,fi} \times \gamma_M} \quad (41)$$

$t_{d,fi}$: Tempo de resistência ao fogo para ligações desprotegidas. Calculado de acordo com a expressão (31) enunciada no capítulo 4.

- Ligação aço-madeira (M-A-M)

Tabela 5-15 – Cálculo do tempo de resistência ao fogo para a ligação M-A-M

Diâmetro	N_{Ed} (kN)	$N_{Ed,fi}$ (kN)	F_{vRk} (kN)	k	η	η_{fi}	$t_{d,fi}$ (min)
Ligação aparafusada							
$\Phi 12$	300	180	692,5	0,085	0,226	0,337	17,5
	100	60	249,3		0,209	0,313	18,4
	30	18	165		0,095	0,142	27,7
$\Phi 20$	300	180	1248		0,125	0,188	24,4
	100	60	312		0,167	0,250	21,0
	30	18	145,4		0,108	0,161	26,2
Ligação com cavilhas							
$\Phi 8$	300	180	645,1	0,085	0,243	0,363	16,7
	100	60	268,8		0,194	0,290	19,3
	30	18	147,8		0,106	0,158	26,4
$\Phi 12$	300	180	711,5		0,220	0,329	17,8
	100	60	284,6		0,183	0,274	20,0
	30	18	149,8		0,105	0,156	26,6
Ligação com placas denteadas							
$\Phi 62$	300	180	520,6	0,065	0,301	0,449	18,5
	100	60	173,5		0,301	0,449	18,5
	30	18	71,9		0,218	0,325	23,5
$\Phi 95$	300	180	516,7		0,303	0,453	18,4
	100	60	172,2		0,303	0,453	18,4
	30	18	83,5		0,187	0,280	25,8
Ligação com placas metálicas							
$\Phi 62$	300	180	425	0,065	0,368	0,550	15,4
	100	60	151,1		0,345	0,516	16,4
	30	18	75,6		0,207	0,310	24,2
$\Phi 95$	300	180	488,9		0,320	0,479	17,5
	100	60	163		0,320	0,479	17,5
	30	18	54,3		0,288	0,431	19,1

- Ligação madeira-madeira (M-M-M)

Tabela 5-16 – Cálculo do tempo de resistência ao fogo para a ligação M-M-M

Diâmetro	N_{Ed} (kN)	$N_{Ed,fi}$ (kN)	F_{vRk} (kN)	k	η	η_{fi}	$t_{d,fi}$ (min)
Ligação pregada							
$\Phi 3,7$	300	180	487,9	0,08	0,321	0,480	14,2
	100	60	162,6		0,321	0,480	14,2
	30	18	50		0,313	0,468	14,5
$\Phi 5,0$	300	180	482,6		0,324	0,485	14,1
	100	60	120,7		0,432	0,646	10,5
	30	18	58,9		0,266	0,397	16,6
Ligação aparafusada							
$\Phi 12$	300	180	691,2	0,065	0,226	0,339	22,9
	100	60	259,2		0,201	0,301	24,7
	30	18	102,6		0,152	0,228	28,9
$\Phi 20$	300	180	763,5		0,205	0,306	24,4
	100	60	327,2		0,159	0,238	28,2
	30	18	181,8		0,086	0,129	37,7
Ligação com cavilhas							
$\Phi 8$	300	180	565	0,04	0,277	0,414	32,1
	100	60	242,2		0,215	0,322	38,4
	30	18	81,3		0,193	0,288	41,2
$\Phi 12$	300	180	664,8		0,235	0,352	36,2
	100	60	265,9		0,196	0,293	40,7
	30	18	72		0,217	0,325	38,2
Ligação com placas denteadas							
$\Phi 62$	300	180	629,1	0,065	0,249	0,372	21,4
	100	60	314,6		0,166	0,248	27,6
	30	18	83,2		0,188	0,281	25,7
$\Phi 95$	300	180	693,3		0,226	0,338	22,9
	100	60	231,1		0,226	0,338	22,9
	30	18	94,4		0,166	0,248	27,6
Ligação com anéis metálicos							
$\Phi 80$	300	180	528	0,065	0,296	0,591	18,7
	100	60	176		0,296	0,591	18,7
	30	18	58,6		0,267	0,399	20,3
$\Phi 126$	300	180	521,9		0,300	0,448	18,5
	100	60	173,9		0,300	0,448	18,5
	30	18	58		0,270	0,404	20,1

6 DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Temperatura ambiente

O dimensionamento a temperatura ambiente realizado no capítulo anterior para os três tipos de ligação estudados, seguiu todos os critérios definidos no Eurocódigo 5, parte 1-1, e foram obtidas diferentes configurações, com diferentes números de ligadores, consoante o ligador adoptado. São precisamente essas diferentes configurações obtidas, que vão merecer uma análise e levar a algumas conclusões.

Um primeiro ponto a analisar, são os resultados obtidos, e a relação dos valores de capacidade resistente da ligação ($F_{v,Rk}$), com a variação dos ligadores e também dos seus diâmetros. Constata-se que o valor da capacidade resistente de uma maneira geral assume o menor valor para o caso dos pregos e o maior valor para o caso dos conectores de placa denteada e anéis metálicos. Isso traduz desde já as suas valências enquanto ligadores, os pregos são fortes para aplicações em ligações com pequenas cargas e os conectores os mais adequados para maiores cargas.

Entre as três geometrias diferentes estudadas, observa-se uma semelhança de valores entre as duas ligações aço-madeira, com chapa metálica lateral e central, sendo certo que no caso da chapa metálica central há um ganho de resistência da capacidade de carga verificável para todos os ligadores. No caso da ligação madeira-madeira, a capacidade de carga no caso dos parafusos e das cavilhas sofre um acentuado decréscimo, e pelo contrário os conectores duplicam a sua resistência, pelo que é neste tipo de ligação que as placas denteadas e os anéis metálicos têm a sua maior capacidade de carga, concluindo-se que é neste tipo de ligação que tem a sua melhor aplicabilidade.

Um dos factores na escolha do ligador a usar é sem dúvida a sua capacidade resistente na ligação e consequentemente um dimensionamento com um menor número de ligadores, contudo o aspecto económico também tem muita importância, e assim de seguida é analisado também o preço dos ligadores.

Na Tabela 6-1, estão os preços médios em Euros dos ligadores, consultados nas empresas da especialidade, e é também com base neles que se deve tomar uma decisão sobre qual o ligador mais adequada para determinada ligação.

Tabela 6-1 – Preços médios em Euros dos ligadores

Ligador	€100 Peças
Pregos lisos	Φ3,7 40 €
	Φ5,0 50 €
Parafusos de porca	M12 211,5€
	M20 501€
Cavilhas	Φ8 142€
	Φ12 310€
Placas denteadas (Bulldog)	BD65 336€
	BD95 485€
Placas metálicas	Φ80 419€
	Φ115 857€
Anéis metálicos	AI (80) 570€
	AIII (126) 873€

Com base nesta informação de custo dos ligadores é possível fazer uma análise custo/número de ligadores, e chegar a uma conclusão sobre os ligadores mais adequados para cada geometria e carga estudados. Nas figuras 6-1, 6-2 e 6-3 apresentam-se os gráficos do preço da ligação em função de cada ligador e da carga, para os três tipos de ligações estudadas.

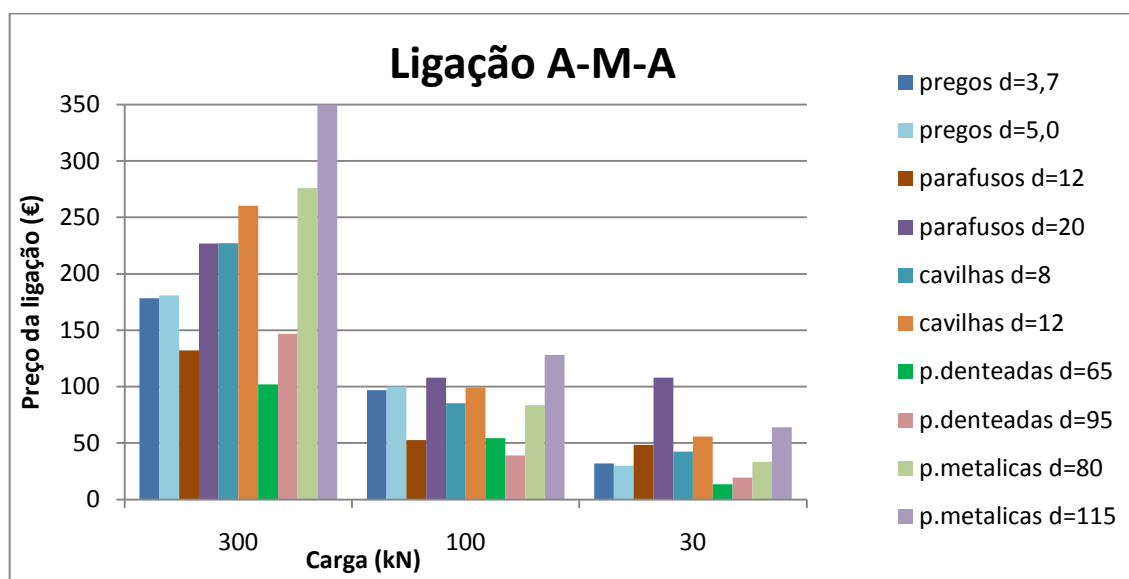


Figura 6.1 – Gráfico de custo da ligação A-M-A

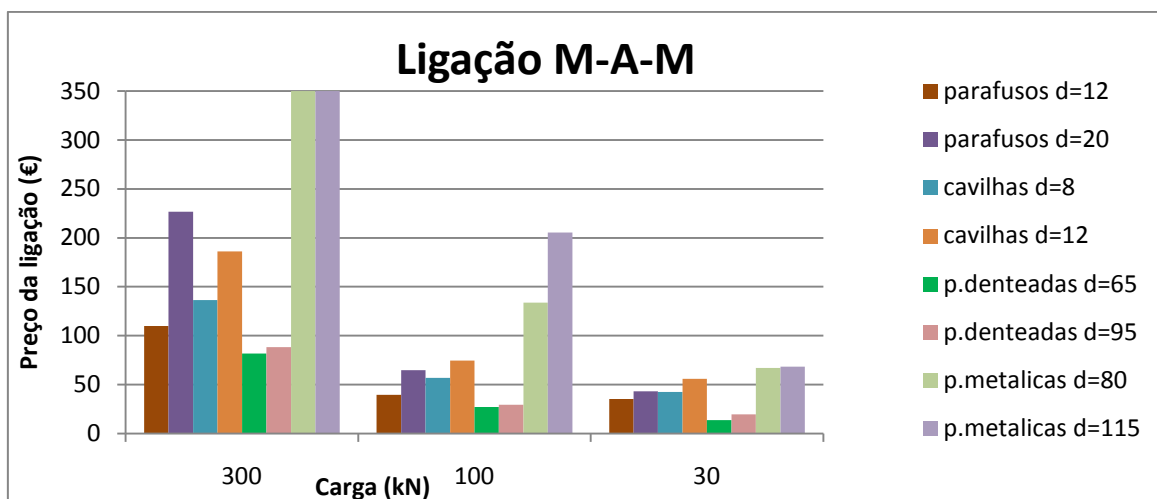


Figura 6.2 – Gráfico de custo da ligação M-A-M

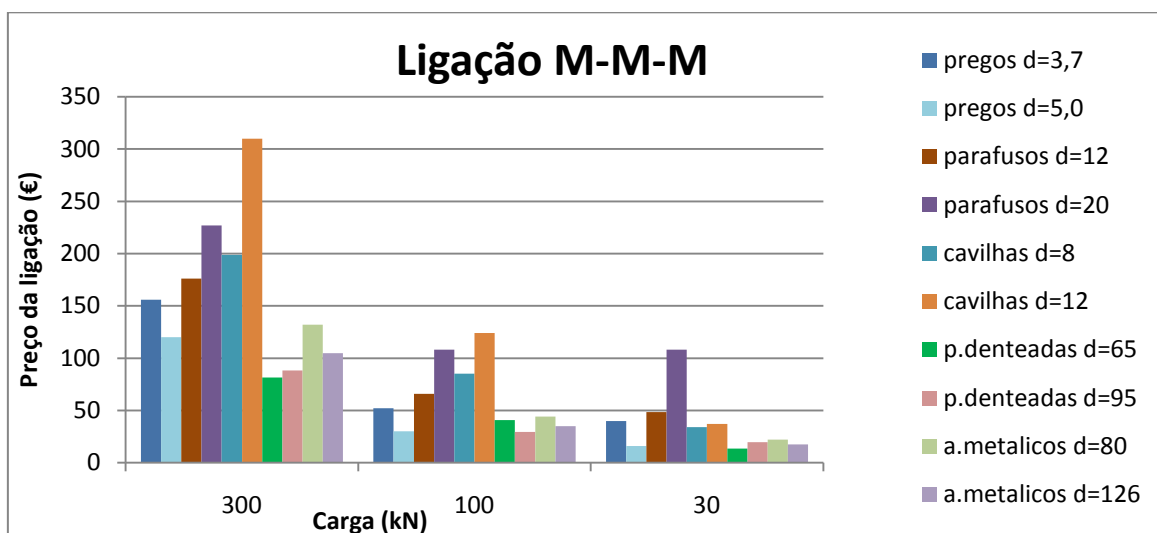


Figura 6.3 – Gráfico de custo da ligação M-M-M

Com base nestes gráficos é possível perceber que ligadores traduzem a solução mais económica para cada carga e para cada ligação. Tendo isso em conta e também o facto de tentar evitar ligações com um elevado número de ligadores ou um reduzido número de ligadores, chegou-se à conclusão presente na tabela 6-2, em que define os ligadores mais apropriados para cada geometria e esforço actuante. De notar também que apesar dos conectores serem boas soluções económicas até para a carga de 30 kN, estes não foram considerados devido ao seu reduzido número e a sua maior complexidade de montagem não justificar a sua utilização.

Tabela 6-2 – Ligadores adoptados por geometria e esforço actuante

Carga	Ligação aço-madeira (chapa metálica lateral)	Ligação aço-madeira (chapa metálica central)	Ligação madeira- madeira
300 kN	Placas denteadas	Placas denteadas	Placas denteadas
100 kN	Parafusos	Parafusos	Parafusos
30 kN	Pregos	Cavilhas	Pregos

O critério da escolha do ligador não segue um caminho único e esta escolha depende muito do critério de quem está a dimensionar. Pode-se dar mais importância ao factor económico ou do menor número de ligadores na ligação. Nesta análise foram tidos em conta esses dois aspectos. Do ponto de vista teórico, a ligação ideal é aquela em que a transmissão de esforços se dá por todos os pontos da área de contacto, contribuindo para uma redução da possibilidade de rotura localizada na madeira, daí resulta uma vantagem em ter um maior número de ligadores. Por outro lado um menor número de ligadores tem vantagens de execução e de simplificação da ligação. Penso que a solução ideal está num meio-termo e de garantir uma boa qualidade da ligação com o número de ligadores mais adequados à estrutura que se está a executar.

6.2 Situação de incêndio

O cálculo ao fogo das ligações dimensionadas a temperatura ambiente, foi efectuado de acordo com os dois métodos presentes no Eurocódigo 5, e com um objectivo de avaliar esses métodos para temperaturas requeridas de 30 e 60 minutos.

Antes da discussão dos resultados obtidos para ambos os métodos, de referir também que a própria madeira lamelada colada, adoptada para este estudo, apresenta uma boa durabilidade e uma boa resistência ao fogo. Como prova disso é a menor taxa de carbonização, β_n , de valor 0,7, por comparação com a madeira maciça, de valor 0,8.

Pela aplicação do método 1 (método simplificado) às ligações dimensionadas a temperatura ambiente, e sem protecção, as ligações apresentam um tempo de resistência ao fogo de 15 minutos para pregos, parafusos de porca e conectores e 20 minutos para cavilhas. Com o objectivo de alcançar o tempo de resistência ao fogo de 30 minutos, existem duas opções, aumentando as dimensões dos elementos de madeira (pelo incremento a_{fi}), contudo limitado para apenas pregos e cavilhas, ou então aplicando uma

protecção à ligação, com a vantagem de não ter restrições aos ligadores e não só ser possível atingir uma resistência ao fogo de 30 minutos, como também os 60 minutos, o máximo permitido pelo Eurocódigo 5. Estas duas opções diferentes e os resultados obtidos, vão ser analisados de seguida.

De acordo com as tabelas 5-8 e 5-9, o aumento das dimensões dos elementos de madeira, no caso da ligação pregada não traduz nenhum ganho de capacidade resistente à ligação, isto deve-se ao correspondente modo de rotura obtido, isto é, uma rotura por plastificação dos ligadores e portanto por mais que as dimensões sejam aumentadas, não se altera o valor da capacidade de carga. Quanto à ligação usando cavilhas, também não há uma relação aparente de ganho resistência com o aumento das dimensões, esse ganho de capacidade de carga da ligação situa-se entre os 5 e os 10 %, e a maior percentagem dá-se na ligação madeira-madeira. Em conclusão pode-se dizer que não existe uma relação directa entre a capacidade de carga do ligador em função da espessura dos elementos de ligação, e embora a ligação seja sobredimensionada com o aumento das dimensões dos elementos de madeira, isso pode não se traduzir num ganho de resistência da ligação.

Recorrendo à protecção das ligações através de painéis, com três diferentes tipos de materiais, contraplacado, gesso cartonado tipo A e tipo F, consoante o tempo de resistência ao fogo de 30 ou 60 minutos, obteve-se o número de painéis necessários. Pela análise da tabela 5-12, conclui-se que dos três materiais usados para protecção, o gesso cartonado tipo F, que corresponde ao tipo corta-fogo, é o que necessita de uma menor espessura. No geral todos os materiais estudados constituem uma óptima solução para alcançar a resistência ao fogo desejada, contudo o gesso cartonado pelas suas óptimas propriedades de resistência ao fogo, é o material com melhor desempenho.

Em relação ao método 2, a sua aplicação às ligações dimensionadas a temperatura ambiente, sem protecção, é efectuada com o objectivo de garantir um tempo de resistência ao fogo de 30 minutos. Os resultados obtidos estão divididos em duas diferentes análises, a verificação ao fogo e o cálculo do tempo de resistência para as diferentes ligações.

Impondo um tempo de resistência ao fogo de 30 minutos, conforme apresentado nas tabelas 5-13 e 5-14, a maioria das ligações não verifica essa resistência. As únicas excepções são na ligação madeira-madeira, uma ligação aparafusada e as ligações com cavilhas. Um ponto importante que se constata é a relação directa entre o coeficiente k (que

depende de cada ligador), com o factor η , que é aplicado na redução da capacidade de carga. Sendo assim quanto menor é o factor k , maior é o factor η , e por sua vez a redução da capacidade de carga é menor. Pelos valores obtidos, temos como menor valor de k , 0,04, correspondente às cavilhas e portanto daí vem a sua maior capacidade de resistência ao fogo. Pelo contrário temos como maior valor de k , 0,085, correspondente aos parafusos de porca, e consequentemente uma baixa resistência ao fogo, e portanto um necessário maior incremento de número de ligadores, de modo a conseguir verificar a resistência ao fogo. O dimensionamento ao fogo por este método, está assim dependente do coeficiente k , um coeficiente que provém de resultados experimentais, cujo valor influencia todos os resultados obtidos neste método. Na Tabela 6-3, é apresentado a percentagem média para cada ligador do aumento de capacidade de carga à temperatura ambiente, necessário para a ligação verificar um tempo de resistência ao fogo de 30 minutos.

Tabela 6-3 – Percentagem de aumento da capacidade de carga necessário para alcançar uma resistência ao fogo de 30 minutos.

Ligador	% F_{vRk} necessário de reforço da ligação	
	Ligação M-A-M	Ligação M-M-M
Pregos	-	63%
Parafusos de porca	104%	41%
Cavilhas	160%	0%
Placas denteadas	105%	57%
Placas metálicas	132%	-
Anéis metálicos	-	108%

No caso do cálculo do tempo de resistência ao fogo para cada ligação, de acordo também com o método 2, apresentado nas tabelas 5-15 e 5-16, apresenta resultados semelhantes. Como era de esperar, existe relação entre as duas análises, e por conseguinte, para as ligações que é necessário um maior reforço de resistência, são as que apresentam um menor tempo de resistência ao fogo.

Por este método, as cavilhas na ligação madeira-madeira são as que apresentam um maior período de resistência ao fogo ultrapassando os 30 minutos e chegando em alguns casos aos 40 minutos.

6.3 Comparação Método1-Método2

Depois de obtido os resultados para as ligações estudadas aplicando o método 1 (método simplificado) e o método 2 (método de redução da carga), é importante agora fazer uma análise comparativa entre eles, e saber os seus pontos fortes e as suas limitações, e em último caso aquele que fornece melhores resultados.

A dificuldade de comparação é devida à natureza distinta de ambos os métodos. O método simplificado é essencialmente empírico, enquanto o método de redução da carga é de base experimental. À medida que decorreram os cálculos, usando ambos os métodos, as suas diferenças acentuaram-se ainda mais, sendo impossível uma comparação dos valores obtidos, é possível uma análise comparativa entre a aplicação dos dois métodos.

Pelo método simplificado é retirado imediatamente um tempo de resistência ao fogo para ligações desprotegidas, desde que o seu dimensionamento respeite o cálculo e as disposições construtivas presentes no Eurocódigo 5, parte 1-1. Uma desvantagem é que se pretendermos aumentar esse tempo de resistência, só o podemos fazer para os ligadores, pregos, parafusos de enroscar e cavilhas, através do incremento das dimensões, e está limitado a apenas a um máximo de 30 minutos. Para as restantes situações só resta a aplicação de protecção nas ligações. Apesar de ser um método simples e fácil de aplicar, tem muitas falhas ao nível da aplicação a ligações desprotegidas.

No caso do método de redução da carga e fazendo essa comparação para os 30 minutos de resistência ao fogo, os resultados obtidos divergem muito de acordo com a ligação estudada. Por exemplo no caso da ligação madeira-madeira usando cavilhas, é fácil atingir essa resistência ao fogo e pelo contrário usando uma ligação aço-madeira, usando parafusos de porca é bastante dispendioso conseguir essa mesma resistência. Estas discrepâncias, associadas ao coeficiente k , torna difícil a aplicabilidade deste método. Contudo, usando este método é possível ter uma noção mais aproximada do verdadeiro comportamento de cada ligador ao fogo, e por isso há uma distinção mais acentuada entre as resistências dos vários ligadores do que no método simplificado.

Em conclusão, o método simplificado pela sua simplicidade e pelos bons resultados que fornece é o método com melhor aplicabilidade. Na resistência ao fogo para 30 minutos analisada, o método simplificado, através do aumento das dimensões dos elementos de madeira da ligação em valores a oscilar entre os 11 e 16 mm, tem melhor aplicabilidade,

que o método 2, que exige um sobredimensionamento da ligação, podendo atingir valores de 100% de aumento do número de ligadores, bastante mais dispendioso e de difícil execução. O método de redução da carga, de aplicação mais complexa, embora tenha como objectivo uma melhor descrição do verdadeiro comportamento ao fogo das ligações, está limitado aos casos estudados experimentalmente, que ainda requerem uma melhor refinação dos resultados e do valor final de k .

7 CONCLUSÕES

7.1 Conclusões Gerais

No dimensionamento a temperatura ambiente quando chega o momento da escolha do ligador a usar, as possibilidades criativas são enormes e não é possível definir uma regra única ou uma solução para cada situação. Usando um critério do meio-termo entre o aspecto económico e o número de ligadores, evitando os extremos de ligações só com um ligador, ou com um número demasiado elevado de ligadores, penso que é o melhor caminho para um bom desempenho estrutural. Dos estudos efectuados e já comentados, de realçar o bom desempenho das placas denteadas em todas as ligações estudadas e da óptima aplicabilidade das cavilhas para cargas reduzidas.

A análise ao fogo das diferentes configurações estudadas revela que ambos os métodos definidos no Eurocódigo 5, parte 1-2, tem algumas limitações, sendo pouco específicos e nalguns casos muito vagos. Conforme já referido no capítulo anterior, o método simplificado tem uma aparência mais simples e uma melhor aplicabilidade que o método de redução da carga, muito mais complexo e dependente de coeficientes específicos de situações experimentais analisadas. Ambos os métodos não traduzem o comportamento real dos ligadores metálicos em situação de incêndio, optando somente por garantir maiores espaçamentos ou maior número de ligadores, evitando assim a análise concreta dos ligadores ao fogo. No Eurocódigo 5, a verificação ao fogo para os elementos de madeira está muito mais concreta e objectiva, que para o caso das ligações, e portanto considero que essa é uma parte a rever com base nos desenvolvimentos experimentais desenvolvidos nesse campo.

O tempo de resistência ao fogo de 30 minutos, é susceptível de ser alcançado usando os dois métodos. Contudo, pelos resultados obtidos, é uma resistência demasiado elevada para ligações desprotegidas. Analisando os resultados do dimensionamento de painéis de protecção das ligações, penso que não só após os 30 minutos devem ser aplicados, como também para tempos de resistência menores, já que são soluções fáceis de aplicar, pouco dispendiosas e que garantem uma adequada resistência ao fogo, independentemente do método que estejamos a usar. Para tempos de resistência ao fogo superiores aos 30 minutos, é obrigatoriamente necessário proteger as ligações, e os painéis de gesso cartonado tipo F, corta-fogo, são a solução mais adequada.

Este trabalho consistiu apenas no estudo e análise do Eurocódigo 5, para o cálculo estruturas de madeira, estudando o dimensionamento das ligações a temperatura ambiente e depois em situação de incêndio. Contudo, uma análise experimental em situação de incêndio para as ligações e ligadores aqui estudados, ou uma análise recorrendo a programas de elementos finitos, traziam mais dados importantes e uma análise mais profunda que complementava esta análise mais superficial. À semelhança do que se vê um pouco pela bibliografia consultada, existem já diversos estudos nesta área fazendo recurso dos dois aspectos acima referidos e que tem por objectivo acrescentar dados e melhorar a actual metodologia presente no Eurocódigo 5, para o dimensionamento ao fogo de ligações.

7.2 Sugestões para futuros desenvolvimentos

De seguida são enunciadas algumas sugestões para possíveis desenvolvimentos futuros que servem de desenvolvimento e de complemento a este trabalho:

- Consideração de diferentes esforços actuantes (por exemplo, cargas mais baixas ou mais elevadas que as consideradas neste trabalho), para estudar outro tipo de solicitações que procurem representar melhor a realidade das estruturas de madeira.
- Realização de ensaios experimentais às ligações dimensionadas, e através deles determinar a real resistência das ligações para cada ligador estudado.
- Realização de ensaios experimentais em laboratório de fogo, para avaliar a resistência ao fogo das ligações e determinar os tempos de resistência ao fogo de cada ligador e compará-los com os obtidos aplicando os métodos do Eurocódigo 5.
- Utilização de métodos de cálculo avançado, recorrendo a programas de elementos finitos para a determinação da capacidade de carga e servir como base de estudo das ligações em situação normal e de incêndio.

BIBLIOGRAFIA

- Aicher, S. (2003). Structural Adhesive Joints Including Glued-in Bolts. Timber Engineering. S. Thelandersson and H. J. Larsen, Wiley and sons: 333-356.
- Andrea, F., E. Carsten, et al. (2009). "Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails." Fire and Materials **9999**(9999): n/a.
- Andrea Frangi, C. E. M. F. (2009). "Experimental fire analysis of steel-to-timber connections using dowels and nails." Fire and Materials.
- Arguelles, R. and F. Martitegui (2000). Estructuras de Madera - Diseño y cálculo. Espanha, Asociación de investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho (AITIM).
- Blass, H. J. (2003). Joints with Dowel-type Fasteners. Timber Engineering. S. Thelandersson and H. J. Larsen, Wiley and sons: 315-330.
- Branco, J., P. Cruz, et al. (2006). Asnas de madeira: A importância da rigidez das ligações. Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPEE 2006. Lisboa, LNEC.
- Cachim, P. and J.-M. Franssen "Assessment of Eurocode 5 Charring Rate Calculation Methods." Fire Technology.
- Cachim, P. B. and J.-M. Franssen (2009). "Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model." Fire Safety Journal.
- Chen, C. J., T. L. Lee, et al. (2003). "Finite element modeling for the mechanical behavior of dowel-type timber joints." Computers & Structures **81**(30-31): 2731-2738.
- Custódio, J., J. Broughton, et al. (2009). "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints." International Journal of Adhesion and Adhesives **29**(2): 173-185.
- Daudeville, L., L. Davenne, et al. (1999). "Prediction of the load carrying of bolted timber joints." Wood Science and Technology **33**: 15-29.
- Echavarría, C. and A. Salenikovich (2008). "Analytical model for predicting brittle failures of bolted timber joints." Materials and Structures.
- EN1991-1-2 (2002). "Actions on structures - Part 1-2 - General actions - Actions on structures exposed to fire " CEN.
- EN1995-1-1 (2004). "Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings." CEN.
- EN1995-1-2 (2004). "Design of timber structures - Part 1-2: General- Structural fire design." CEN.
- González Fueyo, J., M. Dominguez, et al. (2009). "Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear." Materials and Structures **42**(3): 385-397.
- Jürgen, K. (2005). "Structural fire design according to Eurocode 5 - design rules and their background." Fire and Materials **29**(3): 147-163.
- Kharouf, N., G. McClure, et al. (2003). "Elasto-plastic modeling of wood bolted connections." Computers & Structures **81**(8-11): 747-754.
- Konig, J. and F. M. (2001). The performance of timber connections in fire - Test results and rules of Eurocode 5. Proceedings of International Rilem Symposium "Joints in timber structures". R. Publications. France.
- Konig, J. and S. Winter (2004). The Eurocode 5 Fire part - EN 1995-1-2. Proc World Conf on Timber Eng.. Lahti, Finland: 319-324.
- Larsen, H. J. (2003). Introduction: Fasteners, Joints and Composite Structures. Timber Engineering. S. Thelandersson and H. J. Larsen, Wiley and Sons: 303-313.

- Mendes, P. (1994). Ligações em estruturas de madeira - tecnologia e dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 5. FEUP - Universidade do Porto. Portugal.
- Moss, P., A. Buchanan, et al. (2009). "Experimental Testing and Analytical Prediction of the Behaviour of Timber Bolted Connections Subjected to Fire." Fire Technology.
- Palma, P. and H. Cruz (2007). Mechanical Behaviour of Traditional Carpentry Joints in Service Conditions. From material to Structure - Mechanical Behaviour and Failures of the Timber Structures. ICOMOS. Italia.
- Santos, C. L., A. M. P. De Jesus, et al. (2009). "Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection." Construction and Building Materials **23**(1): 171-182.
- Sawata, K. and M. Yasumura (2002). "Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners." Journal of Wood Science **48**(2): 138-146.
- Serrano, E. and P. Gustafsson (2007). "Fracture mechanics in timber engineering – Strength analyses of components and joints." Materials and Structures **40**(1): 87-96.
- Sjödin, J. and E. Serrano (2008). "A numerical study of methods to predict the capacity of multiple steel-timber dowel joints." Holz als Roh- und Werkstoff **66**(6): 447-454.
- UNE (EN 912). "Timber fasteners. Specifications for connectors for timber".
- White, H. R. (2002). Analytical methods for determining fire resistance of timber members. Handbook of Fire Protection Engineering. S. o. F. P. Engineers. Massachusetts, National Fire Protection Association.

ANEXO A

TABELAS DE DIMENSIONAMENTO A TEMPERATURA AMBIENTE PARA OS DIFERENTES TIPOS DE LIGADORES

1-Ligação Aço-Madeira com chapa metálica lateral (A-M-A)

Carga (N)	Dimensões (mm)	Diâmetro (mm)	$F_{v,Rk}$ (N)	$F_{v,Rd}$ (N)	Configuração de ligadores (simétrica)	Espaçamentos e distâncias (mm)			
						a_1	a_2	$a_{3,t}$	$a_{4,c}$
PREGOS									
300	t1=8mm t2=100mm	3,7	672	414	14x16	55	20	60	20
		5,0	830	511	12x15	60	25	65	25
100	t1=8mm t2=100mm	3,7	672	414	11x11	55	20	60	20
		5,0	830	511	10x10	60	25	65	25
30	t1=8mm t2=50mm	3,7	672	414	5x8	55	20	60	20
		5,0	830	511	5x6	60	25	65	25
PARAFUSOS DE PORCA									
300	t1=8mm t2=100mm	12	12830	7895	5x6	60	50	90	40
		20	18179	11187	3x7	100	80	140	60
100	t1=8mm t2=100mm	12	12830	7895	3x4	60	50	90	40
		20	18179	11187	2x5	100	80	140	60
30	t1=8mm t2=50mm	12	6415	3948	2x6	60	50	90	40
		20	9089	5593	2x5	100	80	140	60
CAVILHAS									
300	t1=8mm t2=100mm	8	4434	2729	8x10	40	25	80	25
		12	8839	5439	6x7	60	40	85	40
100	t1=8mm t2=100mm	8	4434	2729	5x6	40	25	80	25
		12	8839	5439	4x4	60	40	85	40
30	t1=8mm t2=50mm	8	4434	2729	3x5	40	25	80	25
		12	6414	3947	3x3	60	40	85	40
PLACAS DENTEADAS									
300	t1=8mm t2=100mm	62	19442	11964	3x5	100	80	130	40
		95	22686	13961	3x5	150	120	190	60
100	t1=8mm t2=100mm	62	19442	11964	2x3	100	80	130	40
		95	22686	13961	1x4	150	120	190	60
30	t1=8mm	62	11550	7108	1x2	100	80	130	40

	t2=50mm	95	13596	8367	1x2	150	120	190	60
PLACAS METÁLICAS									
300	t1=8mm t2=100mm	80	7872	4844	3x11	160	100	120	50
		115	11316	6964	3x8	230	140	180	70
100	t1=8mm t2=100mm	80	7872	4844	2x5	160	100	120	50
		115	11316	6964	2x4	230	140	180	70
30	t1=8mm t2=50mm	80	7872	4844	1x4	160	100	120	50
		115	11316	6964	1x4	230	140	180	70

2-Ligação Aço-Madeira com chapa metálica central (M-A-M)

Carga (N)	Dimensões (mm)	Diâmetro (mm)	$F_{v,Rk}$ (N)	$F_{v,Rd}$ (N)	Configuração de ligadores (simétrica)	Espaçamentos e distâncias (mm)			
						a_1	a_2	$a_{3,t}$	$a_{4,c}$
PARAFUSOS DE PORCA									
300	t1=96mm t2=8mm	12	13850	8523	5x5	60	50	90	40
		20	26000	16000	5x4	100	80	140	60
100	t1=96mm t2=8mm	12	13850	8523	3x3	60	50	90	40
		20	26000	16000	3x2	100	80	140	60
30	t1=50mm t2=8mm	12	10312	6346	2x4	60	50	90	40
		20	18179	11187	1x4	100	80	140	60
CAVILHAS									
300	t1=96mm t2=8mm	8	6720	4135	6x8	40	25	80	25
		12	11858	7297	5x6	60	40	85	40
100	t1=96mm t2=8mm	8	6720	4135	5x4	40	25	80	25
		12	11858	7297	4x3	60	40	85	40
30	t1=50mm t2=8mm	8	4926	3031	3x5	40	25	80	25
		12	8321	5121	3x3	60	40	85	40
PLACAS DENTEADAS									
300	t1=96mm t2=8mm	62	21692	13349	3x4	100	80	130	40
		95	28704	17664	3x3	150	120	190	60
100	t1=96mm t2=8mm	62	21692	13349	2x2	100	80	130	40
		95	28704	17664	1x3	150	120	190	60

30	t1=50mm t2=8mm	62	17978	11063	1x2	100	80	130	40
		95	20883	12851	1x2	150	120	190	60
PLACAS METÁLICAS									
300	t1=96mm t2=8mm	80	4723	2906	3x15	160	100	120	50
		115	6790	4178	3x12	230	140	180	70
100	t1=96mm t2=8mm	80	4723	2906	2x8	160	100	120	50
		115	6790	4178	3x4	230	140	180	70
30	t1=50mm t2=8mm	80	4723	2906	2x4	160	100	120	50
		115	6790	4178	1x4	230	140	180	70

3-Ligação madeira-madeira (M-M-M)

Carga (N)	Dimensões (mm)	Diâmetro (mm)	$F_{v,Rk}$ (N)	$F_{v,Rd}$ (N)	Configuração de ligadores (simétrica)	Espaçamentos e distâncias (mm)			
						a_1	a_2	$a_{3,t}$	$a_{4,c}$
PREGOS									
300	t1=50mm t2=100mm	3,7	1251	770	12x18	55	20	60	20
		5,0	2011	1238	10x12	60	25	65	25
100	t1=50mm t2=100mm	3,7	1251	770	8x10	55	20	60	20
		5,0	2011	1238	5x6	60	25	65	25
30	t1=36mm t2=50mm	3,7	999	615	5x10	55	20	60	20
		5,0	1842	1134	4x4	60	25	65	25
PARAFUSOS DE PORCA									
300	t1=50mm t2=100mm	12	8640	5317	5x8	60	50	90	40
		20	18179	11187	3x7	100	80	140	60
100	t1=50mm t2=100mm	12	8640	5317	3x5	60	50	90	40
		20	18179	11187	2x5	100	80	140	60
30	t1=36mm t2=50mm	12	6415	3948	2x6	60	50	90	40
		20	9089	5593	2x5	100	80	140	60
CAVILHAS									
300	t1=50mm t2=100mm	8	4036	2484	8x10	40	25	80	25
		12	6648	4091	5x10	60	40	85	40
100	t1=50mm	8	4036	2484	5x6	40	25	80	25

	t2=100mm	12	6648	4091	4x5	60	40	85	40
30	t1=36mm	8	3386	2084	3x4	40	25	80	25
	t2=50mm	12	6000	3692	2x3	60	40	85	40
PLACAS DENTEADAS									
300	t1=50mm	62	26214	16132	3x4	100	80	130	40
	t2=100mm	95	38516	23702	3x3	150	120	190	60
100	t1=50mm	62	26214	16132	2x3	100	80	130	40
	t2=100mm	95	38516	23702	1x3	150	120	190	60
30	t1=36mm	62	20804	12802	1x2	100	80	130	40
	t2=50mm	95	23591	14518	1x2	150	120	190	60
ANÆIS METÁLICOS									
300	t1=50mm	80	22003	13540	3x4	160	100	120	50
	t2=100mm	126	43491	26764	2x3	260	160	190	80
100	t1=50mm	80	22003	13540	1x4	160	100	120	50
	t2=100mm	126	43491	26764	1x2	260	160	190	80
30	t1=36mm	80	14669	9027	1x2	160	100	120	50
	t2=50mm	126	28994	17842	1x1	260	160	190	80

ANEXO B

De seguida apresentam-se três soluções exemplificativas de uma ligação, projectada a temperatura ambiente e com duas soluções diferentes de dimensionamento em situação de incêndio.

Das ligações estudadas e dimensionadas no capítulo 5, é escolhida para a apresentação de três desenhos exemplificativos, a ligação madeira-madeira, com ligadores cavilha de diâmetro 12mm, dimensionada para um esforço actuante de 100 kN. É uma ligação com uma configuração de 4x5 cavilhas e é uma ligação simétrica.

Para os dois casos de dimensionamento em situação de incêndio aqui exemplificados, o primeiro consiste no aumento das dimensões pelo parâmetro a_{fi} , e corresponde a uma resistência ao fogo de 30 minutos. O segundo consiste na aplicação de um painel de protecção de gesso cartonado, e corresponde a uma resistência ao fogo de 60 minutos.

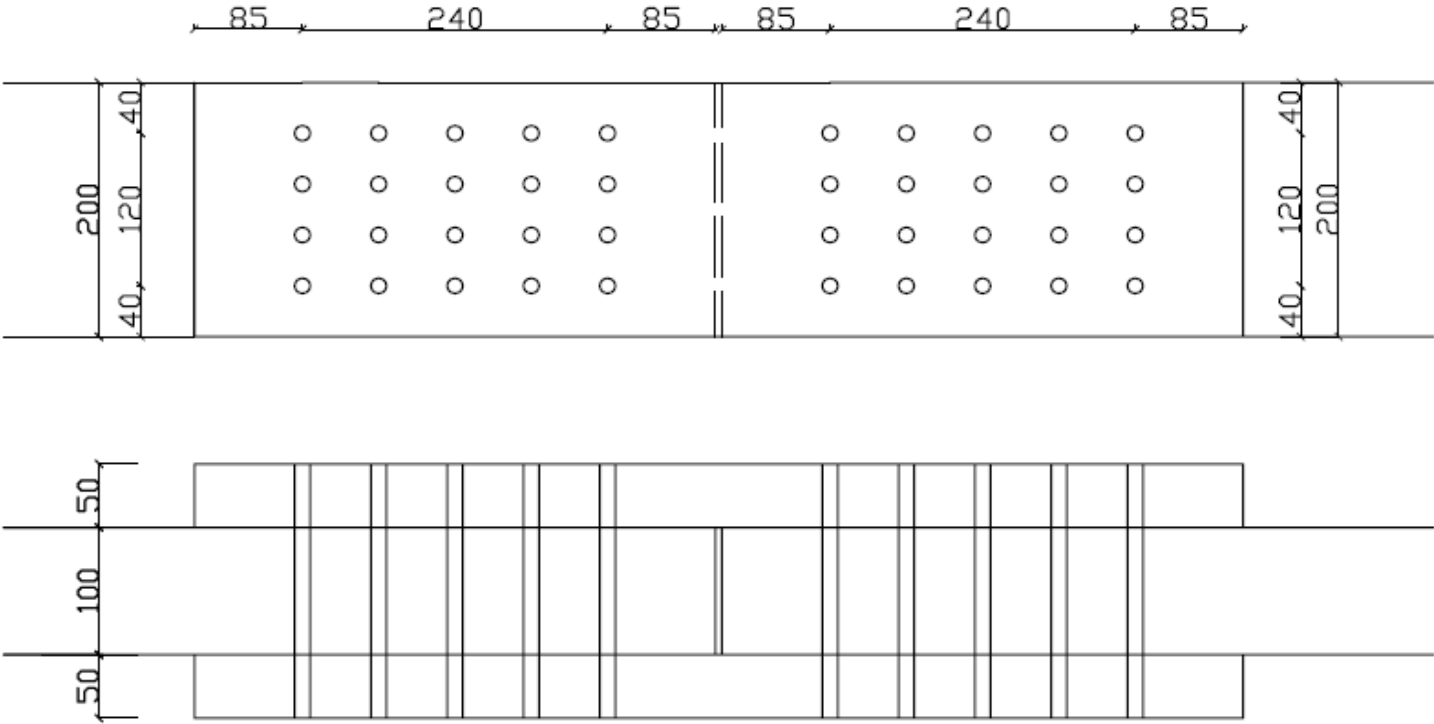
Desenho 1: Ligação madeira-madeira, com cavilhas, dimensionada a temperatura ambiente;

Desenho 2: Ligação madeira-madeira, com cavilhas, dimensionada ao fogo para uma resistência de 30 minutos, através do incremento a_{fi} ;

Desenho 3: Ligação madeira-madeira, com cavilhas, dimensionada ao fogo para uma resistência de 60 minutos, protegida por um painel de gesso cartonado;

DESENHO 1

LIGAÇÃO MADEIRA-MADEIRA COM CAVILHAS Ø12

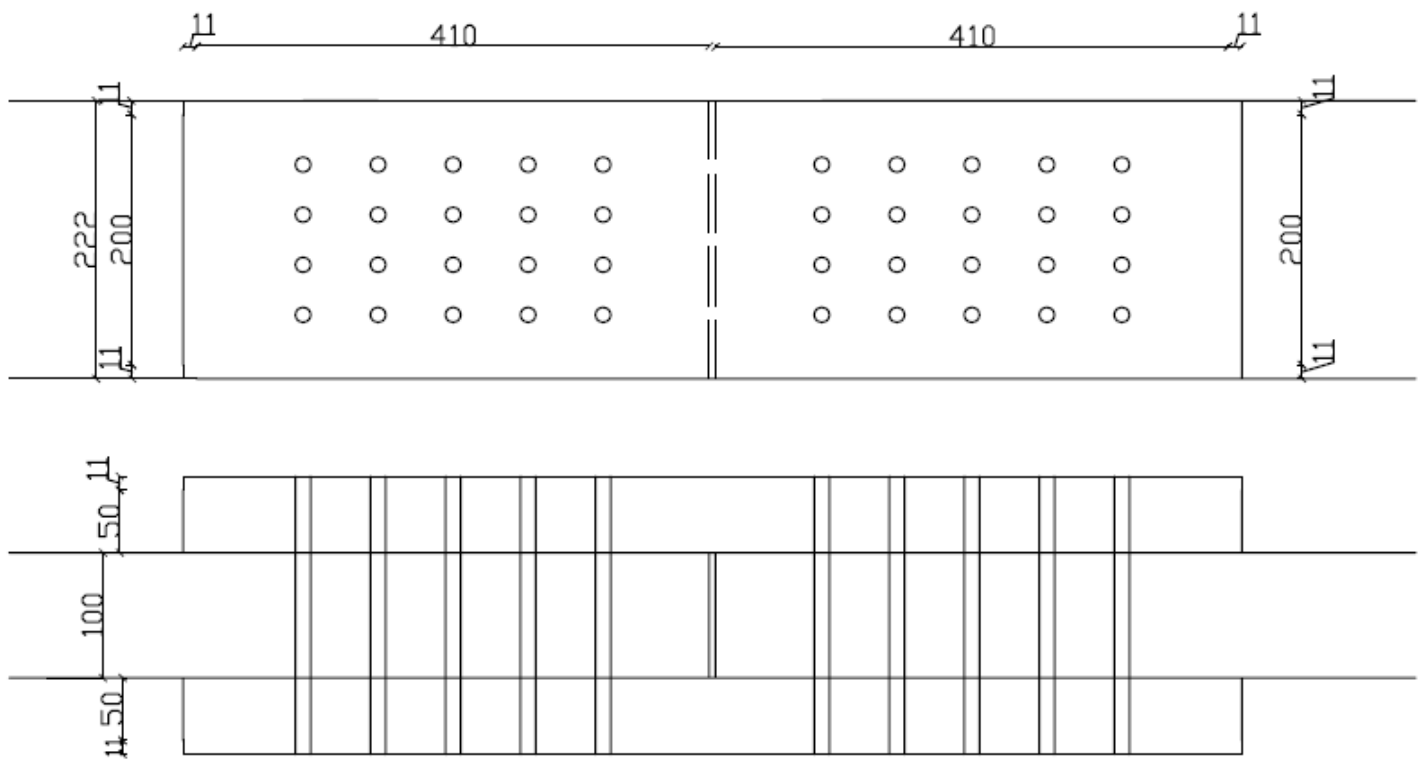


ESPAÇAMENTOS:

a1	60 mm
a2	40 mm
a3,t	85 mm
a4,c	40 mm

DESENHO 2

LIGAÇÃO MADEIRA-MADEIRA COM CAVILHAS Ø12



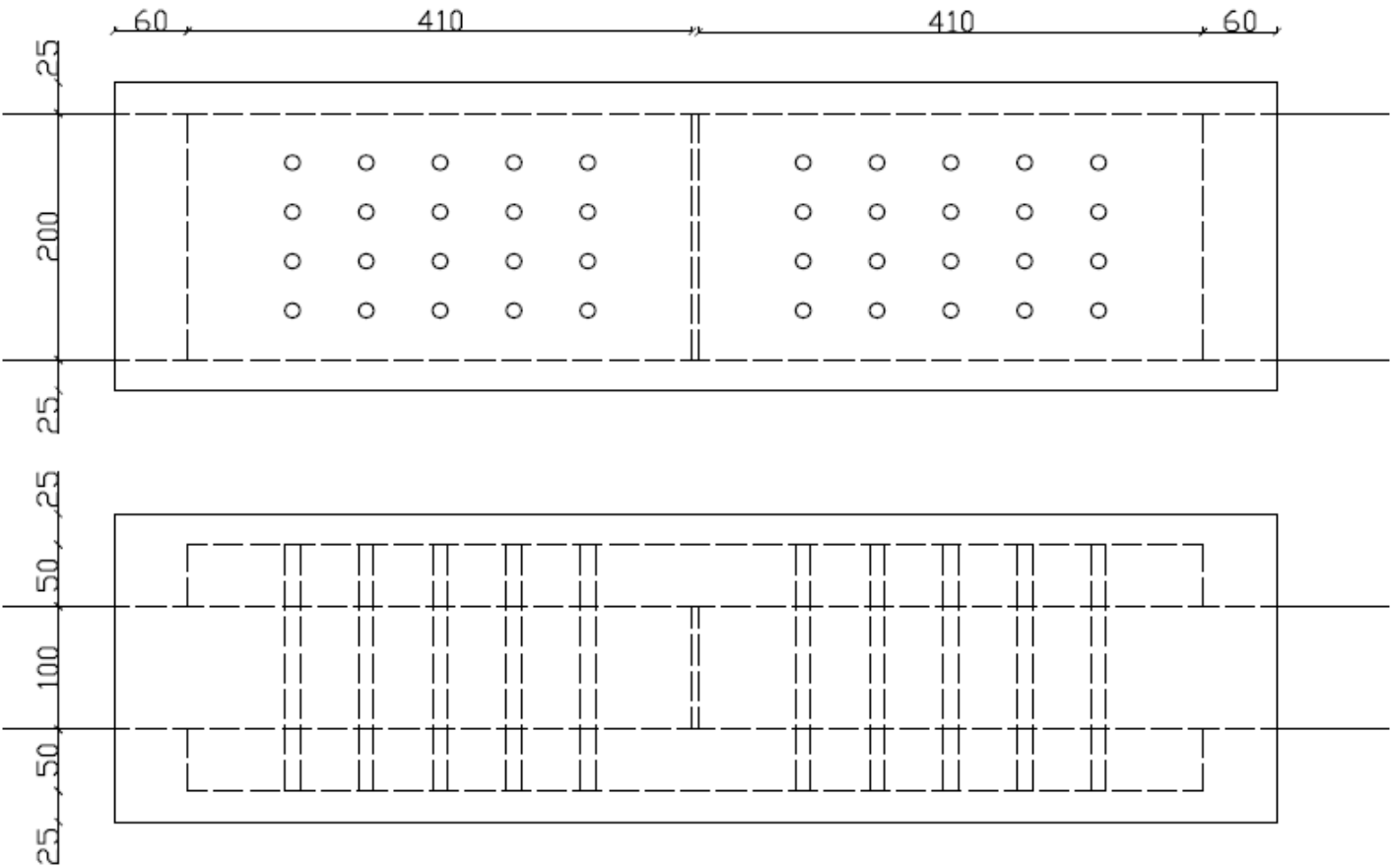
Treq=30min de
resistência ao
fogo

INCREMENTO:

a fi	11 mm
------	-------

DESENHO 3

LIGAÇÃO MADEIRA-MADEIRA COM CAVILHAS Ø12
ADIÇÃO DE UM PAINEL DE GESSO CARTONADO TIPO A, PARA UMA RESISTÊNCIA AO FOGO R60



PAINEL:

ESPESSURA	(2x12,5mm)
-----------	------------